ANALIZA EXPERIMENTALĂ A TENSIUNILOR

I

Editura tehnică

Scanned with OKEN Scanner

Acad. prof. dr. P. S. THEOCARIS, dr. ing. C. ATANASIU,
prof. dr. ing. L. BOLEANȚU, prof. dr. ing. M. BUGA, dr. ing. C. BURADA,
dr. ing. I. CONSTANTINESCU, dr. ing. N. ILIESCU,
prof. dr. doc. ing. D. R. MOCANU, prof. dr. ing. I. PĂSTRĂV, M. TEODORU

ANALIZA EXPERIMENTALĂ A TENSIUNILOR

Bazele teoretice ale metodelor tensometrice și indicații practice privind utilizarea acestora

I

Coordonator:
Prof. dr. doc. ing. D. R. MOCANU

EDITURA TEHNICĂ
BUCUREȘTI

Scanned with OKEN Scanner

În lucrare, care apare în două volume, sînt prezentate metodele și tehnicile utilizate pentru analiza experimentală a deformațiilor și tensiunilor.

În primul volum sînt date, la început, noțiunile și relațiile generale folosite la analiza experimentală a deformațiilor și tensiunilor, iar în capitolele următoare sînt prezentate mai întîi metodele și tehnicile tensometrice devenite clasice (extensometrele mecano-optice, tensometria electrică, fotoelasticitatea și apoi metodele interferometrice (moiré și holografia).

Sînt prezentate în continuare, în volumul doi, metoda causticelor (publicată pentru prima oară sub formă integrată), metoda lacurilor casante, metodele de analiză experimentală utilizate la evaluarea tensiunilor remanente, precum și o serie de aspecte teoretice și practice privind măsurările tensometrice pe modele și indicații privind etalonarea tensometrelor și prelucrarea statistică a rezultatelor măsurărilor tensometrice.

Ținînd seama de dezvoltarea din ultimii ani a metodei elementelor finite, care completează în multe cazuri metodele tensometrice, în ultimul capitol se dau noțiunile de bază privind aplicarea practică a acestei metode.

La sfîrșitul lucrării se prezintă o serie de indicații privind alegerea celor mai adecvate metode și tehnici tensometrice pentru o anumită problemă practică.

Metodele și tehnicile tensometrice prezentate sînt ilustrate de exemple de lucrări practice, în majoritate efectuate de autori.

Colectivul de autori este alcătuit din cadre didactice și cercetători cu experiență, bine cunoscută, în domeniul respectiv. Se remarcă prezența în colectiv a acad. prof. P. S. Theocaris, cercetător de renume mondial în domeniul tensometriei.

Lucrarea se adresează inginerilor și cercetătorilor cu preocupări privind analiza experimentală a stării de tensiune și deformație, precum și studenților din institutele de învățămînt superior tehnic.

Datorită aplicațiilor și indicațiilor practice pe care le prezintă, lucrarea este utilă și personalului auxiliar, care concură la pregătirea și efectuarea lucrărilor experimentale.

Prin nivelul științific și caracterul său aplicativ, lucrarea — prima de acest fel nu numai în țara noastră — constituie un prețios instrument pentru specialiștii preocupați de realizarea unor structuri mai ieftine și, în același timp, mai sigure în exploatare.

Redactor: NATALIA FIUCIUC
Tehnoredactor: ELLY GORUN
Coperta: ELLY GORUN

Bun de tipar: 7-XII-1976. Coli de tipar: 35
Tiraj: 4700+15+75 exemplare legate, CZ: 531.781

C. 359. I. P. INFORMAȚIA
str. Brezoianu nr. 23-25
București

Scanned with OKEN Scanner

EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS, Vol. I and II

Theoretical bases of the stress and strain measurement methods and practical indications

The publication, in two volumes, treats experimental stress analysis methods arranged according to physical phenomenons that rule them. There is emphasis on principles of each methods, its accuracy, the necessary equipment, the measurement preparation and execution techniques, data processing, giving many sketchs, photographs, tables, diagrams, useful for engineering practice.

From the contents: *Vol. I.* Fundamental concepts on stress analysis. Mechano-optical strain-gages. Electrical strain-gages. Photo-elasticity. Interferometry methods.

Vol. II. Study of singular fields by means of caustics. Brittle coatings technique. Experimental determination of the residual stresses. Electrical analogies. Strain-gages calibration. Statistical processing of the experimental data. Error calculation. Finite elements method.

The work is intended for engineers and all specialists from research, designing and teaching institutes, as well as students.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ, Том I и II-ой

Теоретические основы тензометрических методов и практические указания для их применения

Книга содержит, в двух томах, едной фактуры, все существующие тензометрические методы, группированные на основании физических явлений. По существу даются: принцип метода, его точность, описание применяемой аппаратуры, подготовка и осуществление измерений, обработка результатов, это все сопровождаемое рисунками, фотографиями, таблицами, диаграммами, необходимыми в инженерной практике.

Из содержания: *Том 1.* Основы тензометрии. Механо-оптическая тензометрия. Электрическая тензометрия. Фотоупругость. Тензометрия основанная на муаровых полосах.

Том 2: Метод каустик. Метод хрупких лаков. Экспериментальное определение остаточных напряжений. Электрические аналогии. Калибровка тензометров. Статистическая интерпретация результатов измерений. Расчет погрешностей. Метод конечных элементов.

Книга предназначена для инженеров и специалистов, работающих в области промышленности, проектирования и исследования, а также для студентов и работников высших учебных заведений.

Scanned with OKEN Scanner

ANALISE EXPÉRIMENTALE DES CONTRAINTES, Tome I et II

Bases théoriques des méthodes extensométriques et indication pratiques d'utilisation

L'ouvrage, en deux volums, présente les méthodes extensométriques, groupées selon les phénomènes physiques qui les régissent. On traite : le principe de chaque méthode, sa précision, les appareils utilisés, la préparation et la réalisation des mesures, le traitement des résultats, en présentant des nombreux dessins, photos, tableaux, diagrammes, utiles dans la pratique de l'ingénieur.

Extrait du sommaire : *Tome I.* Les bases de l'extensométrie. Extensométres mécano-optiques. Extensométrie électrique. Photoélasticimétrie. L'extensométrie basée sur le phénomène moiré.

Tome II. Méthode des caustiques. Méthode des vernis craquelantes. Détermination expérimentale des tensions résiduelles. Analogie électrique. L'étalonnage des extensomètres. Interprétation des résultats des mesurea. Calcul des erreurs. Méthode des éléments finis.

L'ouvrage s'adresse aux spécialistes de l'industrie et des insitutes d'établissement des projets, de recherche, d'enseignement, aussi bien qu'aux étudiants de l'enseignement technique.

EXPERIMENTELLE SPANNUNGSANALYSE, Band I und II

Theoretische Grundlagen der Dehnungs und Spannungsmessmethoden und praktische Hinweise für deren Anwendung

In die sen zwei Bänden sind in einer einheitlicher Form alle bestehenden Dehnungsmessmethoden beschrieben, geordnet nach den physikalischen Prinzipien, auf denen sie beruhen, Es werden behandelt : Prinzip der Methode, Präzision, die benutzten Apparatur, Vorbereitung und Durchführung der Messungen, Verarbeitung der Ergebnisse. Zahlereiche Skizzen, Fotos, Tabellen, Diagramme für die Ingenieurpraxis ergänzen den text.

Aus dem Inhalt : *I- Band.* Grundlagen der Dehnungsmessung. Mechanisch-optische Spannungsmesser. Elektrische Dehnungsmessung. Spannungsoptik. Dehnungsm essung auf Grund der Moiré-Erscheinung.

II- Band. Kaustikflächenmethode. Elektrisches Analogieverfahren. Lackriisverfahren. Experimentelle Auswertung der Eigenspannungen. Eichung der Geber Statistische Interpretation der Messresultate. Fehlerberechnung. Finite Elementen-Methode.

Das Werk wendet sich an Ingenieure und Spezialisten die in der Industrie, Projektierung und Forschungs institute tätigsind sowie auch an Studenten der Fachschulen.

Scanned with OKEN Scanner

CONTENTS

I

1. **FUNDAMENTAL CONCEPTS ON STRESS ANALYSIS** (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU eng.)

   1.2. Introductory concepts
   1.3. Strains and displacements. Stresses.
   1.4. Relationships between stresses and strains
   1.5. Strength criteria
   1.6. Effect born by the measuring base length and outline
   1.7. The perturbing effect of strain-gages on the stress field
   1.8. Basic characteristics of strain gages
   1.9. Effects of temperature changes in stress analysis
   1.10 General choice criteria for the stress analysis techniques
   1.11. Development and expectancies of stress analysis techniques

2. **MECHANO-OPTICAL STRAIN-GAGES** (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU eng.)

   2.1 General
   2.2 Mechanical strain-gages
   2.3 Mechano-optical strain-gages
   2.4 Pneumatic strain-gages
   2.5 Vibrating chord and acoustic strain-gages
   2.6 Strain-gages with materialized marks

3. **ELECTRICAL STRAIN-GAGES**

   3.1 General (Prof. Dr. M. BUGA eng.)
   3.2 Electrical transducers (Prof. Dr. M. BUGA eng.), M. TEODORU)
   3.3 Measuring principles (Prof. Dr. M. BUGA eng., Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
   3.4 Measuring errors due to external factors (Prof. Dr. M. BUGA eng., Dr. C. BURADA eng.)
   3.5 Strain-gages for measuring mechanical quantities (Dr. I. CONSTANTINESCU eng.)
   3.6 Measuring chains used in electrical strain-gages (Prof. Dr. M. BUGA eng., M. TEODORU)
   3.7 Set-up in view of measurements. Technique of carrying out measurements (Prof. Dr. M. BUGA eng., M. TEODORU)
   3.8 Data processing and interpretation (Prof. Dr. M. BUGA eng.)
   3.9 Examples of measurements in electrical strain-gages (Prof. Dr. M. BUGA eng., Dr. C. BURADA eng., Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU eng.)

4. **PHOTO-ELASTICITY**

   4.1 Concepts of elementar optics (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.2 Optics of the polariscope (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.3 Theory of photo-elasticity (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.4 Recording of photoelastic data (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.5 Stress separation using photoelastic data (Prof. Dr. I. PĂSTRĂV eng.)
   4.6 Stress separation using non photoelastic data (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.7 Application of model results to prototype (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.8 Applications to two-dimensional problems (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.9 Three-dimensional photo-elasticity (Prof. Dr. L. BOLEANTU, Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.10 Applications to three-dimensioual problems (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.11 Dynamic photo-elasticity (Dr. N. ILIESCU)
   4.12 Birefringent coatings (Dr. N. ILIESCU eng.)
   4.13 Material used for model manufacturing (Dr. N. ILIESCU eng.)

5. **INTERFEROMETRY METHODS**

   5.1 Applications of Moiré phenomenon in stress analysis technique (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
   5.2 Use of Moiré fringes obtained by impressing the grid directly on the model (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
   5.3 Grid construction and tests carried out (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
   5.4 Accuracy of tensometric methods based on moiré phenomenon (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
   5.5 Use of moiré fringes obtained by reflexion (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
   5.6 New techniques for the use of moiré fringes in stress analysis (Dr. C. ATANASIU eng., Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)

Scanned with OKEN Scanner

5.7 **Applications of holographic interferometry to stress analysis** (Dr. C. ATANASIU eng.)

II

6. **STUDY OF SINGULAR FIEDS BY MEANS OF CAUSTICS** (Acad. Prof. Dr. P. S. THEOCARIS)

- 6.1 Introduction
- 6.2 Principle of the method
- 6.3 Caustic curve generated at the extreme end of a crack in a bi-refringent plastic plate
- 6.4 Caustic curve generated at the extreme end of a crack in an elastic optically isotropic plate
- 6.5 Characteristic features of caustic curves
- 6.6 Shape of experimental caustics and determination of the stress concentration coefficient
- 6.7 Caustics generated by cracks in the case of singular stress fields
- 6.8 Caustics generated by stress singularities
- 6.9 Pseudo-caustics
- 6.10 Caustics in the case of non singular stress fields
- 6.11 Caustics applications in plasticity
- 6.12 Use of caustics to the study of complex singularities in the case of quasi-isotropic materials

7. **BRITTLE COATINGS TECHNIQUE** (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU, L. NĂILESCU eng.)

- 7.1 Introductory concepts
- 7.2 Brittle coatings and their use
- 7.3 Brittle coatings standardization
- 7.4 Crack detection within the coating layer
- 7.5 Stresses within the varnish layer
- 7.6 Examples of crack fields
- 7.7 Quantitative interpretation of crack fields
- 7.8 The technique of cracking brittle coatings as an auxiliary to electrical strain gage and to photoelasticity

8. **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES**

- 8.1 Source of residual stresses (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
- 8.2 Destructive and half-destructive methods (Prof Dr.Doc. D. R. MOCANU, Dr. C. BURADA eng.)
- 8.3 Destructive and non destructive methods applie for testing welded joints (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU, Prof. Dr. Doc. V. POPOVICI, M. BĂLTĂNOIU eng)
- 8.4 Non destructive methods (Prof. Dr. Doc. D. R. MOCANU)
- 8.5. Measurement of residual stresses in metallic layers built by electrodeposition (Dr. D. HORBANIUC eng. Lecturer)
- 8.6 Use of *X*-rays in stress analysis (Prof. Dr. M. TRIPA eng.)

9. **ELECTRICAL ANALOGIES FOR EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS** (Dr. N. ILIESCU eng.)

- 9.1 Elements of model theory
- 9.2 Electrical modelling of the physical field
- 9.3 Applications

10. **STRUCTURAL MODELS ANALYSIS** (Dr. M. MODIGA eng. Lecturer)

- 10.1 Introductory concepts
- 10.2 Modeling basic theory
- 10.3 Modeling in solving of problems of linear elasticity
- 10.4 Bar systems and slab modeling
- 10.5 Model desing
- 10.6 Choice of model materials
- 10.7 Model building
- 10.8 Model loading
- 10.9 Model testing
- 10.10 Applications

11. **STRAIN-GAGE CALIBRATION** (N. FÎNTÎNARU eng.)

- 11.1 Calibration of removable strain-gages
- 11.2 Electrical strain-gage calibration
- 11.3 Tensometric bridges and amplifier calibration

12. **STATISTICAL PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA** (Prof. Dr. M. BUGA eng., Dr. I. CONSTANTINESCU eng.)

- 12.1 General
- 12.2 Measuring errors
- 12.3 Normal scattering of radom measuring errors
- 12.4 Technical data and performances of measuring means
- 12.5 Statistic processing of measurement data
- 12.6 The least square method
- 12.7 Experimental data processing for the case of multi-dimensional scatterings
- 12.8 Examples of numerical analysis. Conclusions

13. **INTRODUCTION TO FINITE ELEMENTS METHOD** (Dr. I. PASCARIU eng., Lecturer)

- 13.1 Introductory concepts
- 13.2 Elements of matriceal algebra useful to the analysis by finite elements
- 13.3 Theoretic basis of stress analysis by finite elements
- 13.4 Stages of stress analysis by finite elements
- 13.5 Isoparametric finite elements
- 13.6 Application of finite elements in the case of flat slabs bending. A computer program
- 13.7 Problems of eigenvalues (buckling and vibrations)

CONCLUSIONS. Recommendations on the choice of stress analysis methods and techniques

1. Main characteristic features of stress analysis methods and techniques
2. Recommendations on the choice of stress analysis methods and techniques
3. Choice of methods of experimental stress analysis.

Scanned with OKEN Scanner

PREFAȚĂ

Analiza stării de tensiune în ansamblu poate fi definită ca o ramură a mecanicii aplicate care se ocupă cu studiul rezistenței mecanice a structurilor inginerești. Acest scop poate fi realizat în diferite moduri, care pot fi grupate în două mari categorii : metode de analiză teoretică și metode de analiză experimentală. În multe probleme inginerești complexe, metodele teoretice și experimentale sînt folosite în paralel completîndu-se unele pe altele. Pe de altă parte, analiza experimentală a stării de tensiune se bazează, în general, pe considerații teoretice și pe concluzii ale acestora și menține o legătură strînsă cu caracteristicile fizice ale problemelor de rezistență mecanică.

Determinarea cu precizie a stării de tensiune pe cale analitică se poate face doar în cîteva cazuri simple. În majoritatea cazurilor trebuie introduse o serie de ipoteze simplificatoare care îndepărtează soluția analitică de realitate. În aceste cazuri determinările experimentale rezultă a fi sine-qua-non, deoarece fără verificare experimentală, rezultatele obținute pe cale analitică sînt, evident, de eficacitate limitată.

Aplicabilitatea metodelor analitice în analiza stării de tensiune, cel puțin la nivelul actual de cunoaștere, este oarecum limitată și este bine cunoscut faptul că un număr mare de probleme legate de distribuția stării de tensiune, simple și practice, prezintă fie o soluție teoretică cu dificultăți de neînvins, fie este extrem de costisitoare, în termeni de om-ore sau timp de calculator, sau pur și simplu nu prezintă o soluție accesibilă. În aceste cazuri freevente, analiza experimentală a stării de tensiune constituie singura posibilitate de rezolvare a problemelor exceptînd, desigur, cazurile în care poate fi aplicată metoda elementelor finite. Această din urmă metodă a cunoscut o dezvoltare considerabilă în ultimii zece ani, dovedindu-se o metodă universală cu care poate fi abordată eficient orice problemă de analiză a stării de tensiune. Însă, această metodă, care este mai curînd „cvasiexperimentală" decît teoretică, necesită calculatoare

Scanned with OKEN Scanner

cu performanțe ridicate, cu memorie operativă mare, care uneori fac ca să devină foarte costisitoare.

Pe de altă parte, există un număr mare de metode de analiză experimentală a stării de tensiune, care pot rezolva, în prezent, orice problemă de interes practic cu eficiență ridicată și într-un timp minim. Acestea se aplică fie pe modele speciale, fie pe structuri reale care pot fi încercate în condiții normale de lucru, cu toți factorii ce influențează comportarea structurii luate în considerație.

Cu toate acestea se poate afirma că, adesea, cea mai bună cale de soluționare a problemelor de analiză a stării de tensiune este combinarea analizei teoretice cu un procedeu experimental adecvat, astfel ca nu numai experimentul să poată decide, deși idealizările introduse de teorie modifică uneori aspectele esențiale ale problemei, dar determină suficiente elemente pentru verificarea rezultatelor. Această ultimă cale poate fi considerată ca cea mai precisă și mai sigură. Dictonul „Un experiment valorează cît opiniile a o mie de experți", completat cu parafraza la vechiul dicton grec „Drumul de mijloc este cel mai bun", arată calea sigură de a soluționa o problemă științifică, cale care, în majoritatea cazurilor, este cea mai scurtă și mai ieftină.

Prima lucrare cuprinzătoare privind metodele de analiză experimentală a stării de tensiune a apărut în anul 1950 sub îngrijirea profesorului M. Hetényi și sub auspiciile „American Society for Experimental Stress Analysis". Diferitele capitole din acea lucrare au fost scrise de un grup de eminenți colaboratori recunoscuți ca specialiști în domeniile respective. Această primă lucrare de tensometrie a constituit multă vreme cartea standard de referință pentru analiza experimentală a stării de tensiune și un ghid practic pentru proiectanți, ingineri, pentru învățămîntul superior și cercetare și, în general, pentru orice tip de problemă de analiza stării de tensiune.

Cu toate acestea, deși întreaga carte și, în special, unele capitole au fost elaborate astfel încît să cuprindă sistematic și complet noutățile din domeniul respectiv, evoluția rapidă din ultimii douăzeci și cinci de ani a tehnicilor de lucru din analiza experimentală a stării de tensiune a condus nu numai la o îmbunătățire, rafinare, maturizare și perfecționare a metodelor și tehnicilor deja existente, dar și la completarea acestui domeniu al științei cu noi metode potențiale pentru o soluționare mult mai rafinată a problemelor complicate ale construcțiilor și tehnologiilor moderne. Proiectele inginerești și procedeele de producție devin continuu tot mai complexe pentru a asigura fiabilități înalte ale componentelor critice din sistemele inginerești moderne, supuse la sarcini și condiții de lucru care se dovedesc a fi progresiv tot mai severe.

Lucrarea de față, elaborată sub îndrumarea profesorului D. R. Mocanu, încearcă, cu remarcabil succes, să completeze golurile existente în literatura de specialitate prin prezentarea stadiului actual de cunoaștere din domeniul analizei experimentale a stării de eforturi. Scopul principal al acestei lucrări este prezentarea corespunzătoare a principalelor metode de încercare și a subdiviziunilor acestora, într-o manieră care să permită compararea ime-

Scanned with OKEN Scanner

diată și selectarea celui mai potrivit procedeu experimental pentru fiecare problemă particulară în parte.

Evident, este potrivit de remarcat aici că fiecare metodă și dispozitiv particular dezvoltat în lucrare are proprietăți particulare și avantaje speciale, ceea ce o recomandă în mod special pentru studiul problemelor particulare de analiza tensiunilor.

Metodele experimentale de bază descrise în această lucrare acoperă întregul domeniu al analizei experimentale a stării de tensiune. Principiile fundamentale, metodele și aplicațiile, echipamentul și tehnicile de lucru sînt explicate în detaliu, dîndu-se indicații pentru interpretarea datelor experimentale și evaluarea rezultatelor.

Metodele și încercările sînt orientate astfel încît ele să constituie ghid pentru o rezistență mecanică optimă și să asigure o fiabilitate ridicată a structurilor rezultate. Inginerii proiectanți și specialiștii în analiza experimentală a stării de tensiune pot găsi cele mai recente realizări în domeniul metodelor experimentale și pot aplica direct aceste tehnici în vederea unei cît mai bune utilizări a materialelor. Aceste metode pot fi folositoare inginerilor în vederea reducerii consumului de material, pentru reducerea timpului de prelucrare și a prețului de cost, cît și pentru ridicarea productivității muncii.

Aceste tehnici pot fi aplicate pentru controlul siguranței în funcționare și a calității, în vederea obținerii unor produse care să prezinte integritate structurală și utilitate practică.

În acest sens, metodele tensometrice pot fi considerate că contribuie la creșterea productivității.

Prezenta lucrare a fost concepută, în primul rînd, ca o unealtă de lucru pentru ingineri, care trebuie să aibă acces rapid la metodele moderne de analiza stării de tensiune. Materialul a fost împărțit în 13 capitole astfel:

1. Conceptele fundamentale ale analizei stării de tensiune
2. Extensometre mecano-optice
3. Fotoelasticitatea
4. Tensometria electrică
5. Metoda moiré și interferometria holografică
6. Metoda causticelor pentru studiul cîmpurilor singulare de tensiune
7. Metoda lacurilor casante
8. Măsurarea tensiunilor remanente
9. Analogii electrice aplicate pentru analiza stării de tensiune
10. Măsurări tensometrice pe modele
11. Etalonarea tensometrelor
12. Prelucrarea statistică a datelor experimentale
13. Noțiuni privind metoda elementelor finite.

În încheiere: Indicații privind alegerea metodelor și tehnicilor tensometrice.

Fiecare capitol este scris de către specialiști din cercetare și din învățămîntul superior, cu experiență îndelungată în domeniul analizei experimentale a stărilor de tensiune.

Un accent deosebit a fost pus atît pe pregătirea și executarea lucrărilor experimentale cît și pe evaluarea, prelucrarea și interpretarea rezultatelor.

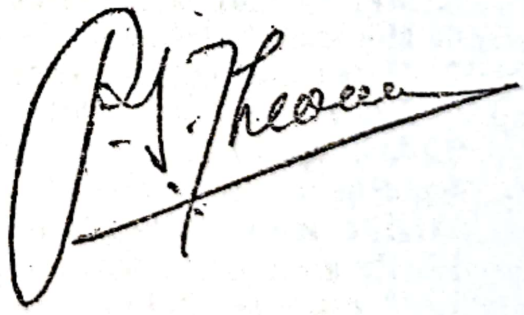
Scanned with OKEN Scanner

Această schemă particulară este conformă cu aplicațiile, orientează caracterul lucrării, care, așa cum s-a mai arătat, se adresează în primul rînd inginerilor. Un număr considerabil de aplicații, la probleme inginerești actuale, cît și o listă bibliografică cuprinzătoare, atașată la sfîrșitul fiecărui capitol, completează lucrarea.

Fără îndoială, lucrarea nu este nerecomandabilă pentru studenți, drept curs de analiza experimentală a stărilor de tensiune predat în institute de învățămînt superior. Teoria de bază pentru fiecare metodă tensometrică este prezentată sistematic și cadrul didactic de specialitate are la îndemînă tot materialul necesar pentru a concepe un curs ușor adaptabil la mijloacele experimentale disponibile.

Pe lîngă metodele de bază ale analizei experimentale a stării de tensiune, care sînt complet acoperite în această lucrare (fotoelasticitate, tensometria de diferite tipuri, metoda lacurilor casante etc.) sînt introduse de asemenea noi metode. În acest sens metoda moiré și interferometria holografică sînt, după cunoștințele mele, pentru prima dată prezentate sistematic, ca o parte dintr-un tratat de analiza experimentală a stării de tensiune, într-o manieră riguroasă și concisă. De altfel, metoda noastră de tratare a cîmpurilor singulare de tensiuni prin metoda optică a causticelor (cap. 6), este un alt exemplu de material inedit, prezentat pentru prima oară într-o formă integrată.

Luînd în considerare faptul că tot acest volum de material a fost tratat în numai aproximativ 1000 pagini, cu siguranță că trebuie apreciat zelul și eforturile nu numai ale editorului acestei remarcabile contribuții, dar și ale tuturor coautorilor și redactorilor, care au colaborat și contribuit fără rezerve la elaborarea aceste lucrări. În sfîrșit, dorim să exprimăm sincere aprecieri coordonatorului lucrării, prof. D. R. Mocanu, pentru viziunea sa de perspectivă, propunînd publicarea acestei cărți, pentru înțelegerea clară a scopului lucrării în care informațiile vitale privind metodele de analiza experimentală a stării de tensiune sînt integrate într-o singură lucrare fundamentală pentru utilizare în cercetare, în învățămîntul inginerese, ca și în instruirea tehnică.



PERICLES S. THEOCARIS

Membru al Academiei din Atena
Membru al Academiei de Artă și Știință din Serbia

Atena, martie 1976

Scanned with OKEN Scanner

CUVÎNT ÎNAINTE

Stabilirea unor dimensiuni raționale pentru organele de mașini și elementele de construcții, constituie una dintre problemele inginerești de importanță majoră, datorită, pe de o parte, faptului că volumul construcțiilor și a utilajelor noi este în continuă creștere, iar pe de altă parte, faptului că performanțele acestora sînt sensibil îmbunătățite de la an la an.

Dimensionarea rațională a diferitelor construcții inginerești conduce nu numai la realizarea unor importante economii de materiale și la sporirea siguranței acestora în exploatare, ci, în multe cazuri, contribuie și la reducerea cheltuielilor de exploatare. Astfel, de exemplu, prin reducerea cu 1% a greutății proprii a materialului rulant de cale ferată se obține — pe lîngă o economie de aproximativ 15 000 tone metal — o reducere cu aproximativ 45 milioane lei a cheltuielilor de exploatare, în cazul transportului pe căile ferate române, la nivelul planului de transport pe anul 1974.

O judicioasă proiectare a diferitelor categorii de construcții este posibilă numai dacă se cunosc, cu suficientă precizie, valorile eforturilor — în diferitele secțiuni ale elementelor ce alcătuiesc construcțiile respective — produse de sarcinile ce acționează asupra acestora în timpul exploatării.

Acest lucru — în majoritatea cazurilor — datorită formelor complicate pe care le au piesele și elementele respective, precum și solicitărilor complexe la care acestea sînt supuse, nu se poate realiza numai pe bază de calcul — cu relațiile cunoscute din rezistența materialelor și disciplinele înrudite — fiind necesare și determinări experimentale, utilizînd una sau mai multe metode sau tehnici tensometrice.

Se poate afirma că, în stadiul actual al tehnicii măsurării deformațiilor, stabilirea pe cale experimentală a valorilor și repartiției tensiunilor produse în elemente de construcții — de sarcinile ce lucrează asupra acestora în domeniul elastic — se poate face, cu suficientă precizie, pentru toate stările de tensiuni și în toate cazurile de solicitare. Analiza experimentală a stării de tensiune (tensometria) constituie un valoros instrument de investigare furni-

Scanned with OKEN Scanner

zînd date valoroase proiectanților preocupați de a realiza construcții economice și în, același timp, cu fiabilitate ridicată.

La ora actuală — în majoritatea cazurilor — construcțiile inginerești, înainte de a fi date în exploatare, sînt verificate din punct de vedere al rezistenței mecanice, prin măsurări tensometrice, iar în cazul instalațiilor și utilajelor — supuse unor sarcini importante în exploatare — prototipurile sînt, de asemenea, verificate prin măsurări tensometrice. Rezultatele măsurărilor, utilizînd tehnicile tensometrice adecvate, dau indicații prețioase cu privire la îmbunătățirile constructive ce se impun înainte de a se trece la fabricația de serie a produsului respectiv.

În cadrul institutelor de învățămînt superior și a unor institute de cercetări din țara noastră funcționează laboratoare de tensometrie, unele obținînd rezultate remarcabile privind utilizarea și perfecționarea diferitelor metode și tehnici tensometrice. Au fost realizate o serie de dispozitive și aparate ce fac obiectul unor brevete de invenție și au fost puse la punct noi tehnici de măsurare a deformațiilor.

Multe dintre rezultatele cercetărilor efectuate de specialiștii din țara noastră au fost publicate în reviste de specialitate din țară și de peste hotare. Unele au fost prezentate la Conferințele internaționale de tensometrie, bucurîndu-se de aprecieri pozitive.

În anul 1966 a fost publicată, în Editura Transporturilor și Telecomunicațiilor, lucrarea : „Determinarea pe cale experimentală a eforturilor unitare" *care prezintă aspectele teoretice și practice privind metodele și tehnicile tensometrice cunoscute pînă la apariția lucrării (cu excepția fotoelasticității).*

Articolele și cărțile menționate mai sus, ca și alte realizări românești în domeniul tensometriei, fac parte din izvoarele utilizate de autori la elaborarea prezentei cărți și sînt cuprinse în bibliografiile capitolelor respective.

Între timp, utilizîndu-se noile cuceriri ale științei și tehnologiei, metodele și tehnicile tensometrice au fost perfecționate și au fost găsite noi tehnici și metode de înaltă precizie cum sînt cele interferometrice. În ultimii ani progrese remarcabile au fost înregistrate — utilizîndu-se realizările spectaculoase din domeniul ciberneticii — și în ce privește prelucrarea rezultatelor măsurărilor tensometrice.

În lucrarea de față, editată în două volume, sînt prezentate aspectele teoretice și, îndeosebi, cele legate de partea aplicativă, privind metodele și tehnicile tensometrice fundamentale utilizate fie ca metode de cercetare, fie pentru măsurări legate de verificarea rezistenței unor structuri din diverse domenii inginerești.

În primul capitol al cărții „Bazele tensometriei" *se definesc unele noțiuni, se prezintă o serie de relații de calcul și construcții grafice, precum și alte elemente de bază legate de analiza experimentală a stării de tensiune.*

În al doilea capitol se prezintă principalele tipuri de extensometre mecano-optice. Aceste aparate au constituit primele mijloace de măsurare a deformațiilor și, în anumite cazuri, așa cum rezultă din cuprinsul cărții, sînt și astăzi utilizate, cu bune rezultate (bineînțeles mult perfecționate), nu numai la determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor ci și la studiul stării de tensiune.

Scanned with OKEN Scanner

În capitolele următoare sînt prezentate, în stadiul actual, metodele și tehnicile tensometrice de bază atît cele devenite clasice (fotoelasticitatea, tensometria electrică, metoda lacurilor casante, analogia electrică ș.a.) cît și metodele recent consacrate (metoda moiré, interferometria holografică, metoda caustice-lor).

Toate metodele și tehnicile tensometrice sînt însoțite de exemple de măsurări, în majoritate efectuate de autori.

Cunoscut fiind efectul tensiunilor remanente — a căror prezență este inevitabilă în multe categorii de construcții — asupra capacității portante a acestora, în cap. 8 se prezintă metodele și tehnicile utilizate la determinarea experimentală a acestor tensiuni, prezentîndu-se diferite exemple de măsurări efectuate în unitățile unde autorii își desfășoară activitatea și sub îndrumarea acestora.

În cazul construcțiilor de mari dimensiuni, efectuarea măsurărilor tensometrice este indicat să se facă pe modele realizate la o scară redusă din materiale adecvate. O serie de aspecte, teoretice și practice, în legătură cu aceste măsurări sînt prezentate în cap. 10.

În cap. 11 se dau indicații practice privind etalonarea tensometrelor fixe (*traductoare rezistive*) *și* amovibile, *iar în cap. 12 se prezintă metodologia, însoțită de exemple, privind prelucrarea statistică a rezultatelor măsurărilor tensometrice.*

Metoda elementelor finite, utilizată mult în ultimii ani, completează, în multe cazuri, metodele și tehnicile tensometrice și constituie o cale mai directă de optimizare a dimensiunilor construcțiilor inginerești. În ultimul capitol al lucrării (cap. 13) se dau noțiunile de bază privind utilizarea practică a acestei metode.

Plecîndu-se de la caracteristicile diferitelor metode și tehnici tensometrice, la sfîrșitul cărții, se dau o serie de indicații privind alegerea celor mai potrivite metode și tehnici tensometrice, în funcție de : felul structurii sau modelului de cercetat, materialul din care acestea sînt realizate, felul solicitărilor la care sînt supuse, condițiile de lucru ș.a.

Pentru fiecare metodă sau tehnică tensometrică, după ce se face o scurtă prezentare a aspectelor teoretice, se dau indicații detailate privind : aparatura utilizată, pregătirea și efectuarea măsurărilor, prelucrarea rezultatelor ș.a. ; ca urmare, cartea se adresează nu numai cadrelor didactice și cercetătorilor de specialitate ci și diferitelor categorii de tehnicieni ce colaborează, sub diferite forme, la efectuarea lucrărilor de tensometrie, precum și studenților din învățămîntul tehnic superior.

La alcătuirea colectivului de autori s-a plecat de la ideea ca elaborarea diferitelor capitole ale cărții să fie făcută de către cadre didactice și cercetători cu bogată experiență în domeniul respectiv, iar exemplele de măsurări care însoțesc capitolele să constituie, în majoritate, lucrări personale ale autorilor sau ale colectivului din care aceștia fac parte.

Din colectivul de autori face parte și academicianul prof. P. S. Theocaris de la Universitatea Națională Tehnică din Atena, bine cunoscut prin activitatea sa remarcabilă de cercetător în domeniul tensometriei, care a pus bazele unor tehnici tensometrice de mare sensibilitate. Capitolul 6, al cărui autor este,

Scanned with OKEN Scanner

prezintă o metodă originală, inedită, pentru studiul deformațiilor și tensiunilor în cazul cîmpurilor singulare de tensiuni. Este vorba de o metodă nouă, cu mare potențial, care permite rezolvarea unor probleme, pînă în prezent, neabordabile.

Cunoscînd întregul conținut al lucrării precum și concepțiile ce au stat la baza elaborării acesteia, acad. prof. P. S. Theocaris s-a oferit, cu amabilitate, să prefațeze lucrarea.

Prezenta carte reprezintă un exemplu de colaborare, dintre cercetătorii români — din diferite centre universitare ale țării (București, Iași, Timișoara, Cluj, Craiova și Galați) — și cercetători de peste hotare și, în același timp, constituie o contribuție la întărirea colaborării balcanice, obiectiv ce se încadrează în orientarea generală a politicii externe promovată de conducerea statului nostru.

Colectivul de autori își exprimă convingerea că lucrarea de față — a cărei apariție precede Primul Simpozion Național de Tensometrie, *ce va fi organizat la Iași în perioada 25—28 aprilie 1977 —, va conduce la perfecționarea, precum și la utilizarea pe o scară și mai largă, a metodelor și tehnicilor de analiză experimentală a deformațiilor și tensiunilor și, în final, va contribui la realizarea unor construcții mai ieftine și, în același timp, mai sigure în exploatare, obiectiv major înscris în cadrul actualului cincinal,* cincinalul revoluției tehnico-științifice.

D. R. Mocanu

Iași, iulie 1976

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINS

Volumul I

1.	**Bazele tensometriei** (prof. dr. doc. ing. D. R. Mocanu)	17
1.1.	Noţiuni introductive	17
1.2.	Tensiuni (eforturi unitare). Stări de tensiune	18
1.3.	Deformaţii şi deplasări	32
1.4.	Relaţiile dintre tensiuni şi deformaţiile specifice	38
1.5.	Criterii de rezistenţă	55
1.6.	Influenţa lungimii şi a profilului bazei de măsurare . . .	59
1.7.	Efectul perturbator al extensometrelor, respectiv al tensometrelor, asupra cîmpului de tensiuni şi de deformaţii .	61
1.8.	Caracteristicile de bază ale tensometrelor	63
1.9.	Efectul variaţiilor de temperatură în tensometrie . . .	65
1.10.	Criterii generale privind alegerea metodei sau tehnicii tensometrice	66
1.11.	Evoluţia şi perspectivele metodelor şi tehnicilor tensometrice	67
2.	**Extensometre mecano-optice** (prof. dr. doc. ing. D. R. Mocanu)	71
2.1.	Generalităţi	71
2.2.	Extensometre mecanice	71
2.3.	Extensometre mecano-optice cu oglinzi	79
2.4.	Extensometre pneumatice	84
2.5.	Tensometre cu coardă vibrantă şi acustice	86
2.6.	Extensometre cu repere materializate	93
3.	**Tensometria electrică**	99
3.1.	Generalităţi (prof. dr. ing. M. Buga)	99
3.2.	Traductoarele electrotensometrice (prof. dr. ing. M. Buga, M. Teodoru)	99
3.3.	Principii de măsurare (prof. dr. ing. M. Buga, prof. dr. doc. D. R. Mocanu)	124

Scanned with OKEN Scanner

3.4. Erori de măsurare provocate de influenţe perturbatoare exterioare (prof. dr. ing. M. Buga, dr. ing. C. Burada) 135
3.5. Captoare pentru măsurarea mărimilor mecanice (dr. ing. I. Constantinescu) 148
3.6. Lanţuri de măsură utilizate în tensometria electrică (prof. dr. ing. M. Buga, M. Teodoru) 188
3.7. Tehnica pregătirii şi efectuării măsurărilor (prof. dr. ing. M. Buga, M. Teodoru) 228
3.8. Prelucrarea şi interpretarea rezultatelor măsurărilor (prof. dr. ing. M. Buga) 252
3.9. Exemple de măsurări tensoelectrice (prof. dr. ing. M. Buga, dr. ing. C. Burada, prof. dr. doc. ing. D. R. Mocanu) 274
4. **Fotoelasticitatea** 298
4.1. Noţiuni de optică generală (dr. ing. N. Iliescu) 298
4.2. Optica polariscopului (dr. ing. N. Iliescu) 307
4.3. Teoria fotoelasticităţii (dr. ing. N. Iliescu) 318
4.4. Înregistrarea datelor fotoelastice (dr. ing. N. Iliescu) 324
4.5. Separarea tensiunilor principale folosind determinările fotoelastice (prof. dr. ing. I. Păstrăv) 335
4.6. Separarea tensiunilor principale prin alte metode (dr. ing. N. Iliescu) 355
4.7. Trecerea rezultatelor de la model la piesa reală (dr. ing. N. Iliescu) 370
4.8. Aplicaţii ale fotoelasticităţii pentru soluţionarea unor probleme plane (dr. ing. N. Iliescu) 374
4.9. Fotoelasticitatea spaţială (prof. dr. ing. L. Boleanţu . şi dr. ing. N. Iliescu) 382
4.10. Aplicaţii ale fotoelasticităţii în soluţionarea unor probleme spaţiale (dr. ing. N. Iliescu) 400
4.11. Fotoelasticitatea în regim dinamic (dr. ing. N. Iliescu) . . . 404
4.12. Lacuri fotoelastice (dr. ing. N. Iliescu) 417
4.13. Materiale folosite pentru confecţionarea modelelor fotoelastice (dr. ing. N. Iliescu) 425
5. **Metode interferometrice** 434
5.1. Utilizarea fenomenului moiré în tensometrie (prof. dr. doc. D. R. Mocanu) 434
5.2. Utilizarea franjelor moiré realizate prin imprimarea reţelei direct pe model (prof. dr. doc. D. R. Mocanu) 445
5.3. Realizarea reţelelor şi efectuarea încercărilor (prof. dr. doc. D. R. Mocanu) 485
5.4. Precizia metodelor tensometrice bazate pe fenomenul moiré (prof. dr. doc. D. R. Mocanu) 503
5.5. Utilizarea franjelor moiré obţinute prin reflexie (prof. dr. doc. D. R. Mocanu) 509
5.6. Noi tehnici şi metode privind utilizarea franjelor moiré în tensometrie (dr. ing. C. Atanasiu şi prof. dr. doc. D. R. Mocanu) 526
5.7. Aplicaţiile interferometriei holografice în analiza stării de tensiune şi de deformaţie (dr. ing. C. Atanasiu) 532

Scanned with OKEN Scanner

1

BAZELE TENSOMETRIEI

Prof. dr. doc. ing. D. R. MOCANU

1.1. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

În mecanica teoretică se studiază echilibrul corpurilor solide în ipoteza că acestea sînt perfect rigide. În realitate solidele, sub acțiunea solicitărilor, se deformează modificîndu-și forma și dimensiunile. Aceste solicitări pot fi : de suprafață, volumice, datorită variațiunilor de temperaturi precum și legăturilor cu alte solide.

Deformațiile solidelor sînt mici și reversibile (elastice) atît timp cît solicitările nu depășesc anumite limite. Pe parcursul creșterii solicitărilor se ajunge la un moment dat la apariția deformațiilor nereversibile (permanente) și, în stadiul final, la ruperea solidului.

Atît timp cît deformațiile sînt reversibile, adică elastice, experiența arată că pentru majoritatea materialelor legătura dintre eforturi și deformații este liniară ; îndată ce solidul își pierde proprietățile sale elastice, relațiile respective devin complicate.

Pentru a se putea stabili — pentru organele de mașini și elementele de construcții — forma și dimensiunile optime care să le permită să suporte, în bune condițiuni, solicitările la care sînt supuse în timpul exploatării lor, este necesar să se calculeze, în prealabil, deformațiile care survin.

Acestea pot fi determinate — în cazul deformațiilor reversibile — cu ajutorul relațiilor de calcul cunoscute din rezistența materialelor și teoria elasticității. Cu ajutorul teoriei plasticității se caută a se evalua mărimea deformațiilor permanente (nereversibile).

Dar chiar în cazul deformațiilor liniare și reversibile, în afară de cazurile simple și limitate ca număr, teoria elasticității conduce la relații de calcul complexe care nu pot forma o soluție analitică convenabilă.

Dacă se are în vedere că teoria elasticității ca și teoria plasticității au la bază o serie de ipoteze cu privire la proprietățile solidelor, dintre care se menționează :

— omogenitatea perfectă a materialului,
— continuitatea materiei,
— izotropia materialului și

Scanned with OKEN Scanner

— elasticitatea perfectă a materialului

rezultă că, chiar în cazurile simple, valoarea deformației stabilită prin calcul, diferă, mai mult sau mai puțin, de valoarea reală.

Datorită acestei situații, se recurge — în multe cazuri — la determinarea pe cale experimentală a deformațiilor utilizînd, în acest scop, diferite proprietăți fizice ale materialelor.

Metodele experimentale amintite permit măsurarea deformațiilor pe piese reale, sau pe modele fizice.

Pentru a face legătura dintre deformația solidului și forțele exterioare care au produs-o se introduce noțiunea de „efort unitar" sau „tensiune" legată direct de cea a forțelor interioare, pretîndu-se la aplicarea teoremelor generale ale mecanicii.

Deformația este un fenomen fizic, accesibil direct măsurării, în timp ce *tensiunea* este o mărime abstractă care, în general, nu poate fi măsurată direct.

Cunoscînd deformațiile și folosindu-se relațiile dintre tensiuni și deformații — cunoscute din teoria elasticității — se pot determina valorile tensiunilor produse de forțele exterioare.

Dezvoltarea metodelor de măsurare a deformațiilor și deci a tensiunilor este legată de apariția aparatelor numite *extensometre*, cînd acestea măsoară deformația Δl a unei lungimi și *tensometre*, cînd măsoară deformația specifică.

Prin extinderea domeniilor de aplicație, și varietatea tehnicilor utilizate, tensometria se prezintă, la ora actuală, ca un ansamblu de metode de măsurare cu largă utilizare în activitatea de cercetare și proiectare. Ea este utilizată, în egală măsură, în domeniul construcției de mașini și în cel al construcțiilor, în general, atît la studiul structurilor statice cît și la studiul structurilor în mișcare.

În cele ce urmează se vor prezenta acele noțiuni din teoria elasticității care constituie suportul tensometriei și a căror cunoaștere este indispensabilă pentru interpretarea corectă a rezultatelor măsurărilor.

Aceste rezultate, odată cunoscute, trebuie comparate cu valorile limită la care se produc deformațiile ireversibile sau sînt depășite rezistențele admisibile. Se vor indica criteriile utilizate în acest scop precum și principalele tipuri de tensometre, precum și condițiile ce trebuie să le îndeplinească un tensometru ideal.

1.2. TENSIUNI (EFORTURI UNITARE). STĂRI DE TENSIUNE

1.2.1. DEFINIȚIA ȘI COMPONENTELE TENSIUNII

Se consideră că un solid oarecare, solicitat de forțele exterioare $F_1, F_2, \ldots, F_5$, ce satisfac ecuațiile de echilibru, este secționat în două, și că partea conturată cu linie întreruptă este îndepărtată. Pentru ca partea rămasă (conturată cu linie continuă) să continue a fi în echilibru, în secțiunea considerată trebuie introduse *forțe interioare*, care să reprezinte

Scanned with OKEN Scanner

acțiunea părții înlăturate asupra celei rămase. Forțele interioare se consideră că sînt repartizate continuu pe secțiune și sînt numite *eforturi*.

Din secțiunea considerată se izolează un element de suprafață ΔA; asupra acestui element se admite că lucrează forța interioară ΔP, avînd o direcție oarecare față de normala n la secțiunea A.

Raportul dintre forța interioară $\overrightarrow{\Delta P}$ și elementul de secțiune ΔA reprezintă valoarea medie a intensității efortului pe secțiune. Limita raportului dintre $\overrightarrow{\Delta P}$ și ΔA, numit *tensiune* sau *efort unitar*, reprezintă intensitatea efortului într-un punct, adică

$$p = \lim \frac{\overrightarrow{\Delta P}}{\Delta A}. \tag{1.1}$$

Tensiunea $\vec{p}$ are aceeași direcție și sens ca și vectorul $\Delta \vec{P}$ ce reprezintă efortul corespunzător elementului de secțiune ΔA.

Valoarea *tensiunii* depinde nu numai de cele trei elemente caracteristice vectorului forță (mărime, direcție și sens) ci și de orientarea elementului de secțiune ΔA, adică de cele trei cosinusuri directoare ale normalei $\vec{n}$ a acestuia. Ca urmare tensiunea este o mărime mai complexă decît vectorul, este un *tensor*.

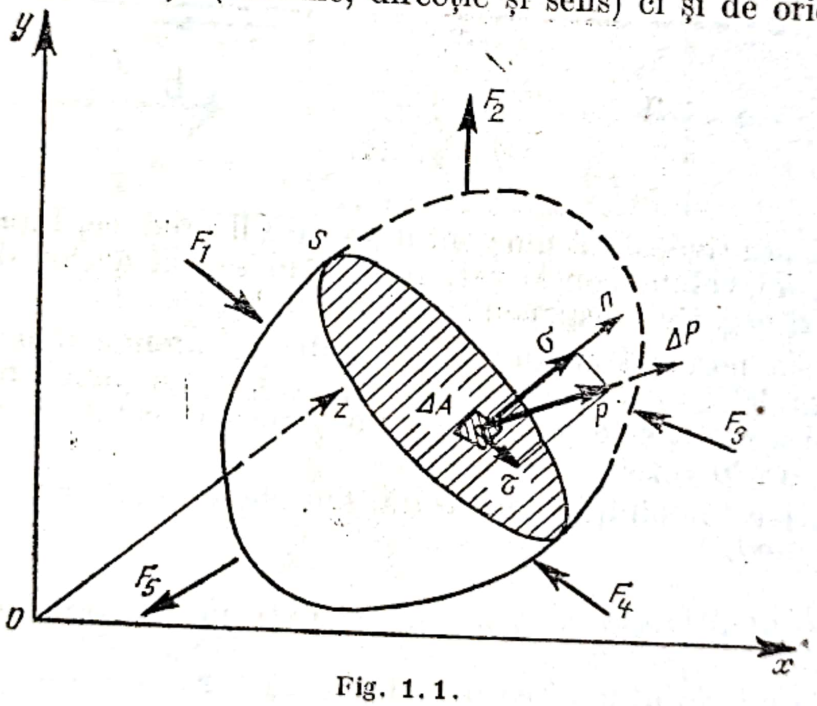


Fig. 1.1.

Avînd o direcție oarecare tensiunea totală $\vec{p}$ poate fi descompusă într-o componentă după normala $\vec{n}$ la elementul de secțiunea ΔA, numită *tensiune normală* și o componentă în planul elementului de secțiune numită *tensiune tangențială*. Între tensiunea totală $\vec{p}$ și cele două componente σ și τ există relația

$$p^2 = \sigma^2 + \tau^2. \tag{1.2}$$

Tensiunea normală σ reprezintă un efect de întindere sau compresiune — după sensul pe care îl are — exercitat de partea din solid înlăturată asupra celei rămase.

Tensiunea tangențială τ, în mod analog, reprezintă un efect de forfecare a materialului în secțiunea în care se aplică (secțiunea S).

Tensiunea normală se consideră pozitivă dacă produce un efect de întindere și negativă dacă produce compresiune. Pentru semnul tensiunilor τ, în general, se adoptă următoarea convenție : tensiunea tangențială

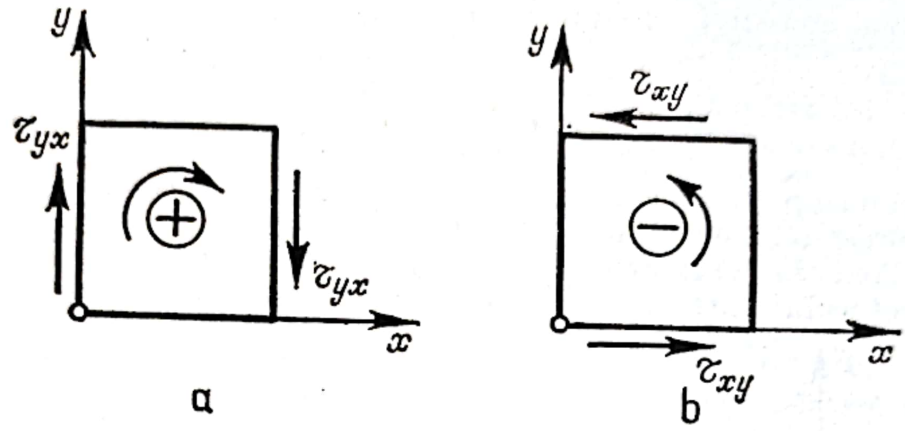


Fig. 1.2.

se consideră pozitivă, dacă momentul pe care îl produce, față de centrul elementului de volum considerat, rotește în sensul acelor de ceasornic (fig. 1.2, a) și negativ în caz contrar (fig. 1.2, b).

Tensiunea normală are un singur indice și anume indicele axei cu care este paralelă, iar tensiunea tangențială are doi indici, primul arată axa cu care aceasta este paralelă, iar al doilea direcția normală la secțiunea pe care lucrează.

În ce privește unitățile de măsură, tensiunile se măsoară în daN/cm² sau daN/mm²*).

1.2.2. DUALITATEA EFORTURILOR UNITARE TANGENȚIALE

Dacă în interiorul unui corp se dezvoltă într-o secțiune plană o tensiune tangențială, atunci într-o secțiune perpendiculară pe prima se dezvoltă o tensiune tangențială de aceeași valoare, perpendiculară pe prima, ambele perpendiculare pe linia de intersecție a celor două plane având sensuri simetrice față de aceeași linie.

Acesta constituie un principiu de bază în teoria elasticității, denumit principiul *dualității* sau *parității tensiunilor tangențiale*.

---

*) În concordanță cu sistemul de unități S.I. În vechiul sistem de unități utilizat pînă în anul 1970, tensiunea (efortul unitar) este măsurată în kgf/cm² (1 kgf ≈ 1 daN).

Scanned with OKEN Scanner

Ținînd seamă de acest principiu, rezultă următoarele egalități între tensiunile tangențiale de pe fețele elementului de volum din fig. 1.3

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}\,;\quad \tau_{yz} = \tau_{zy}\,;\quad \tau_{zx} = \tau_{xz}.$$

Ca urmare dintre cele 9 tensiuni notate în fig. 1.3, componente ale tensorului tensiunii, rămîn numai 6 componente distincte care se determină din ecuațiile de echilibru static ale elementului de volum considerat.

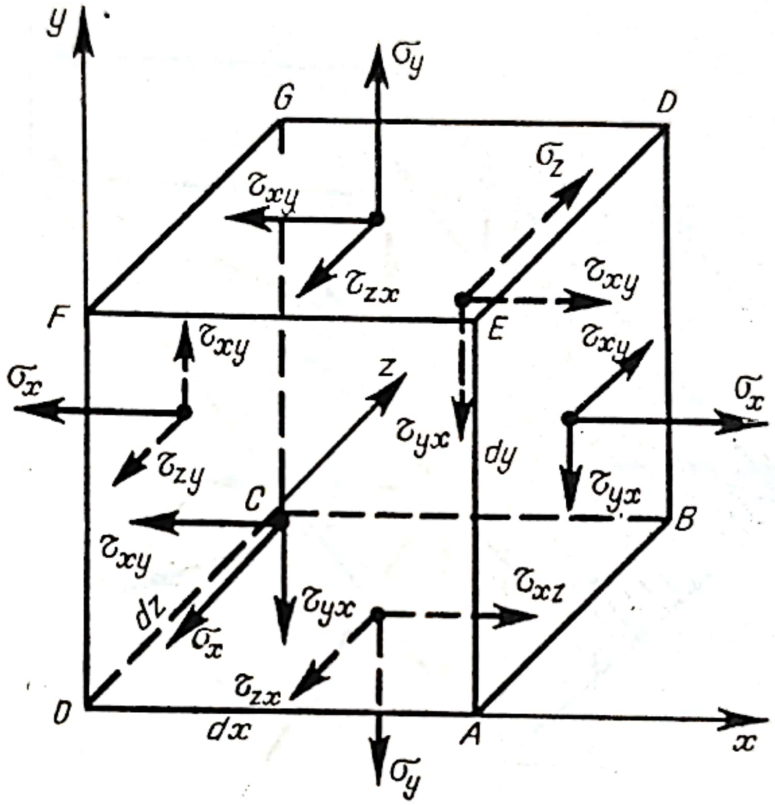


Fig. 1.3.

După cum se va arăta mai departe dacă se cunosc aceste șase tensiuni componente dintr-un punct oarecare se poate determina tensiunea după orice direcție ce trece prin punctul considerat.

1.2.3. COMPONENTELE TENSIUNII DINTR-UN PUNCT SITUAT ÎN INTERIORUL UNUI CORP SOLICITAT

Se consideră un corp elastic supus acțiunii unor forțe exterioare (fig. 1.1). În interiorul lui se consideră un sistem de axe trirectangulare $Oxyz$ (fig. 1.3). Se izolează un element de volum paralelipipedic $dxdydz$ din vecinătatea punctului O, cu muchiile orientate după axele Ox, Oy și Oz. Componentele tensiunilor de pe fețele acestui element, în direcțiile celor trei axe sînt cele indicate în figura menționată.

Scanned with OKEN Scanner

Cele 9 componente ce exprimă starea de tensiune din punctul O; σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}, τ_{yx}, τ_{zy} și τ_{xz} formează împreună tensorul din punctul O. Ansamblul tensorilor care trec prin punctul O caracterizează starea de tensiune în acest punct.

1.2.4. VARIAȚIA TENSIUNILOR ÎN JURUL UNUI PUNCT

a) **Cazul stării spațiale de tensiune.** Se consideră că se cunosc componentele tensiunilor în planele de coordonate Oxy, Oyz și Ozx (fig. 1.4).

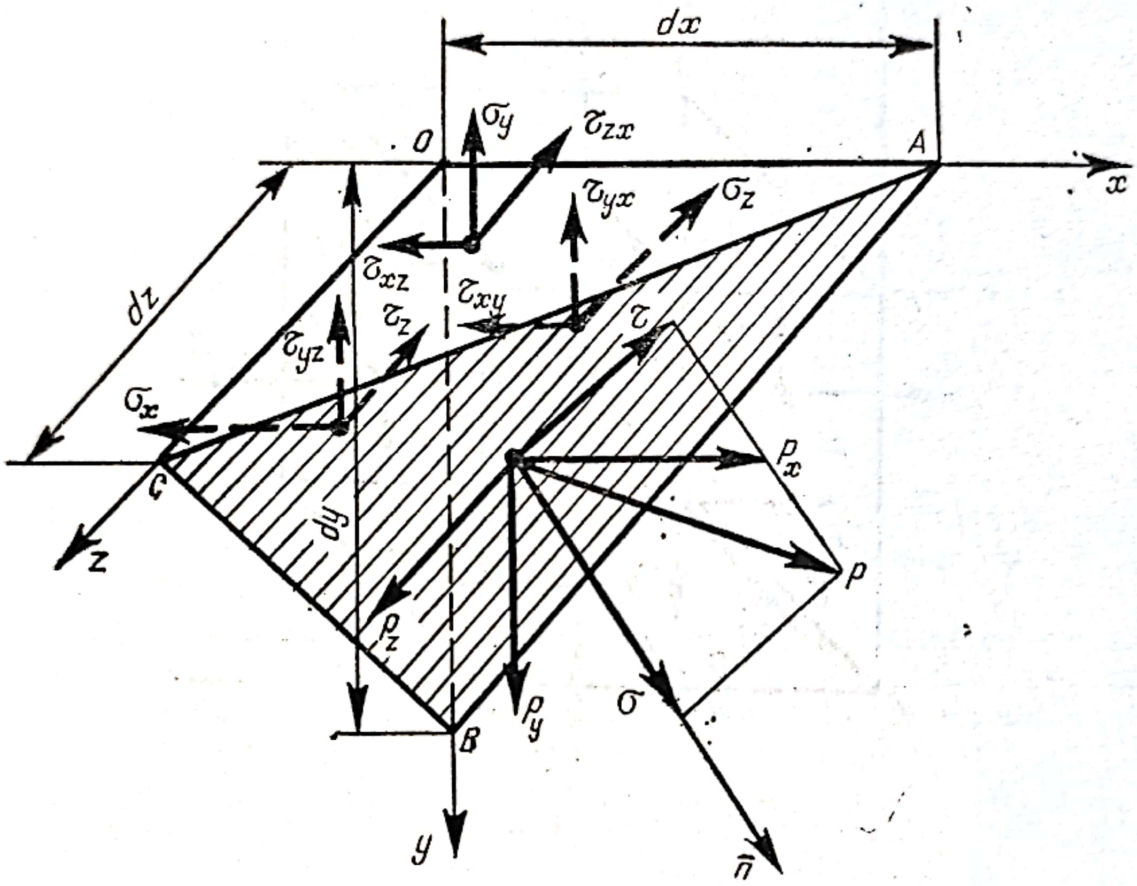


Fig. 1.4.

Se duce un plan ABC la o mică distanță de O, așa fel ca împreună cu planele de coordonate să separe un tetraedru elementar $ABCO$. Normala n la secțiunea ABC are cosinusurile directoare l, m, n cunoscute.

Notînd cu p_x, p_y, p_z componentele tensiunii totale p, pe cele trei axe ale sistemului de referință, din ecuațiile de proiecții pe aceste axe ($\Sigma X = 0$. $\Sigma Y = 0$; $\Sigma Z = 0$) rezultă ecuațiile fundamentale din teoria elasticității tridimensionale

$$\begin{aligned} p_x &= \sigma_x l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n \\ p_y &= \sigma_z m + \tau_{zy} n + \tau_{xy} l \\ p_z &= \sigma_y n + \tau_{xz} l + \tau_{yz} m. \end{aligned} \tag{1.3}$$

Scanned with OKEN Scanner

Cu aceste relaţii se pot calcula componentele tensiunilor din orice secţiune definită prin cosinusurile directoare l, m, n dacă se cunosc tensiunile σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz} şi τ_{zx} în punctul considerat.

Fiind determinate componentele tensiunii totale, se poate calcula:

— valoarea tensiunii normale din secţiunea ABC

$$\sigma = p_x l + p_y m + p_z n; \tag{1.4}$$

— valoarea tensiunii tangenţiale din aceeaşi secţiune

$$\tau = \sqrt{p^2 - \sigma^2} \tag{1.5}$$

unde

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}.$$

Cînd secţiunea ABC se roteşte în jurul punctului O, deci direcţia normalei n se schimbă, valorile tensiunilor σ şi τ variază. Se demonstrează că: există trei direcţii trirectangulare n_1, n_2 şi n_3, numite *direcţii principale*, cărora le corespund tensiuni tangenţiale nule, iar tensiunile normale iau după aceste direcţii, valorile σ_1, σ_2 şi σ_3 numite *tensiuni normale principale*. Secţiunile pe care apar tensiunile normale principale se numesc *plane principale*.

În planele bisectoare dintre planele principale se produc *tensiunile tangenţiale principale*. Valorile acestora sînt

$$\tau_1 = \pm \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3); \quad \tau_2 = \pm \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1); \quad \tau_3 = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2). \tag{1.6}$$

Fig. 1.5 reprezintă elipsoidul tensiunilor sau elipsoidul lui Lamé, a cărui ecuaţie este

$$\frac{p_x^2}{\sigma_1^2} + \frac{p_y^2}{\sigma_2^2} + \frac{p_z^2}{\sigma_3^2} = 1 \tag{1.7}$$

şi care reprezintă locul geometric al vîrfului vectorului tensiunii totale $\vec{p}$ cînd elementul de secţiune ABC se roteşte în jurul punctului O. Direcţiile principale sînt reprezentate de dreptele $O1$, $O2$, $O3$. Fiecărui punct al solidului îi corespunde un elipsoid al tensiunilor.

b) **Cazul stării plane de tensiune.** În cazul stării plane de tensiune nu există solicitări după direcţia Oz, deci $\sigma_3 = 0$ (fig. 1.6, a) iar σ_1 şi σ_2 reprezintă valorile extreme ale tensiunii normale.

Tensiunile pe o secţiune înclinată cu unghiul φ faţă de axa Oy (fig. 1.6, b) sînt date de relaţiile

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\varphi + \tau_{xy} \sin 2\varphi \\ \tau &= -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\varphi + \tau_{xy} \cos 2\varphi; \end{aligned} \tag{1.8}$$

Scanned with OKEN Scanner

Tensiunile normale principale se calculează cu relațiile

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 - 4\tau_{xy}^2} \qquad (1.9)$$

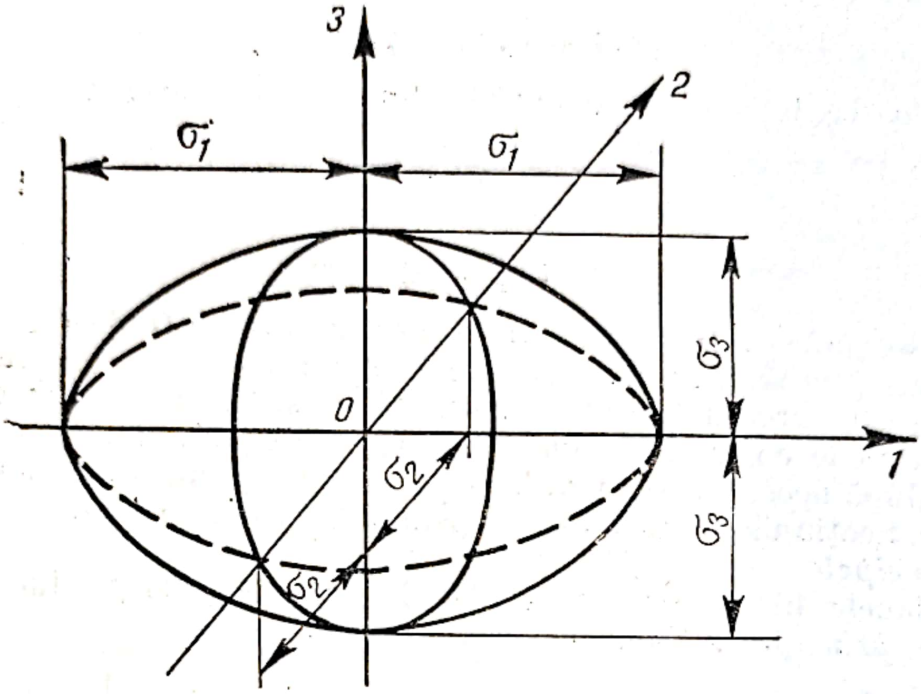


Fig. 1.5.

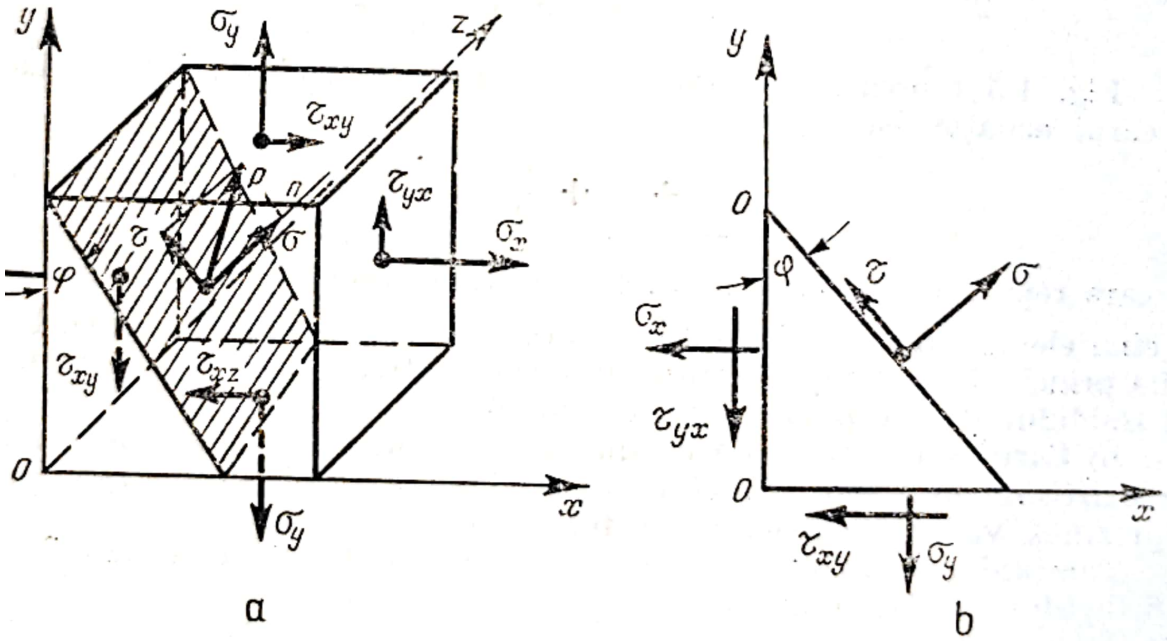


Fig. 1.6.

u direcțiile *1* și *2* (fig. 1.7).

Direcțiile principale se stabilesc cu ajutorul relației

$$\varphi_1 = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}. \qquad (1.10)$$

Scanned with OKEN Scanner

Tensiunile tangențiale maxime apar, după cum s-a arătat mai sus, în plane înclinate la 45° față de direcțiile principale. Valorile lor sînt

$$\tau_{1,2} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \qquad (1.11)$$

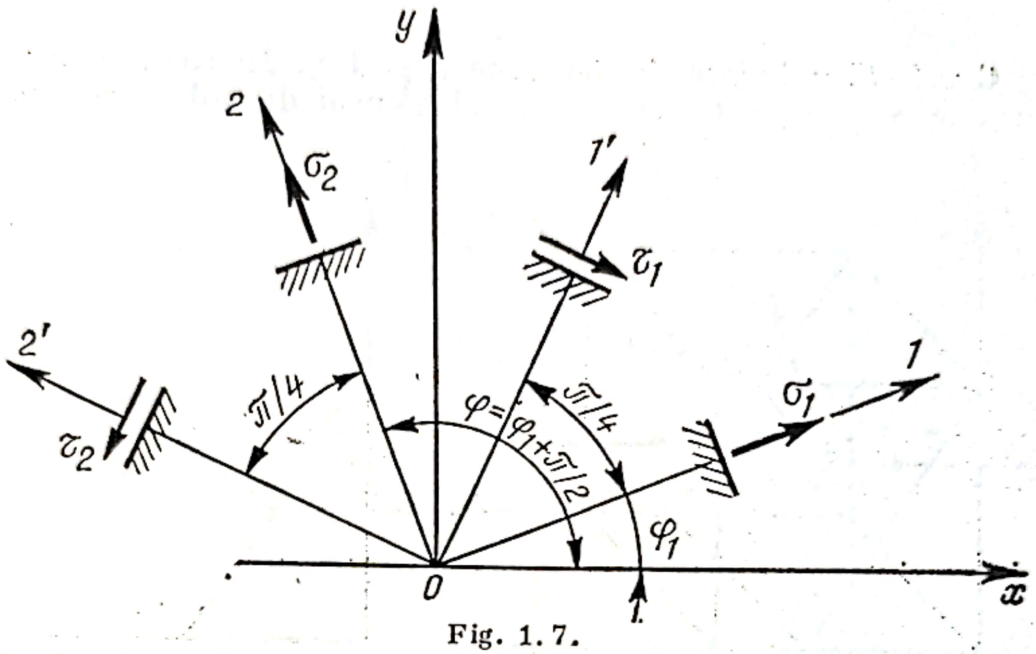


Fig. 1.7.

și au loc în plane înclinate cu 45° față de planele principale, (fig. 1.7, direcțiile *1'* și *2'*).

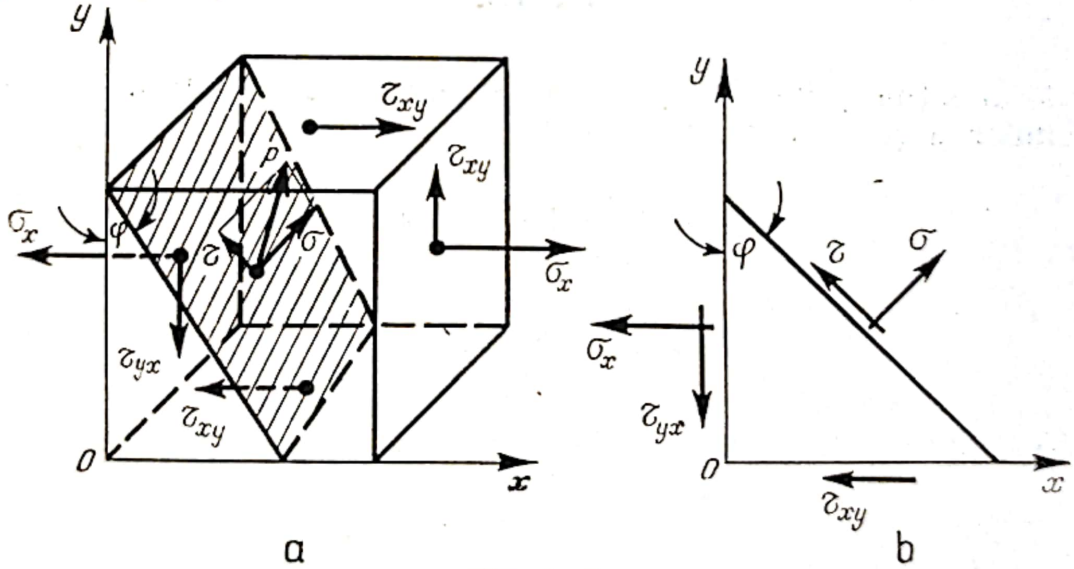


Fig. 1. 8

Dacă se consideră $\sigma_y = 0$ (fig. 1.8), cazul barelor drepte solicitate la încovoiere sau întindere cu răsucire sau forfecare, tensiunile principale au valorile

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2} \qquad (1.12)$$

$$\tau_{1,2} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{yx}^2}. \qquad (1.13)$$

Scanned with OKEN Scanner

Direcţia axelor principale este dată de relaţia

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x}.$$

c) **Cazul stării liniare de tensiune** (fig. 1.9). În cazul stării liniare de tensiune $\sigma = \sigma_3 = 0$, de regulă, elementul de volum se orientează

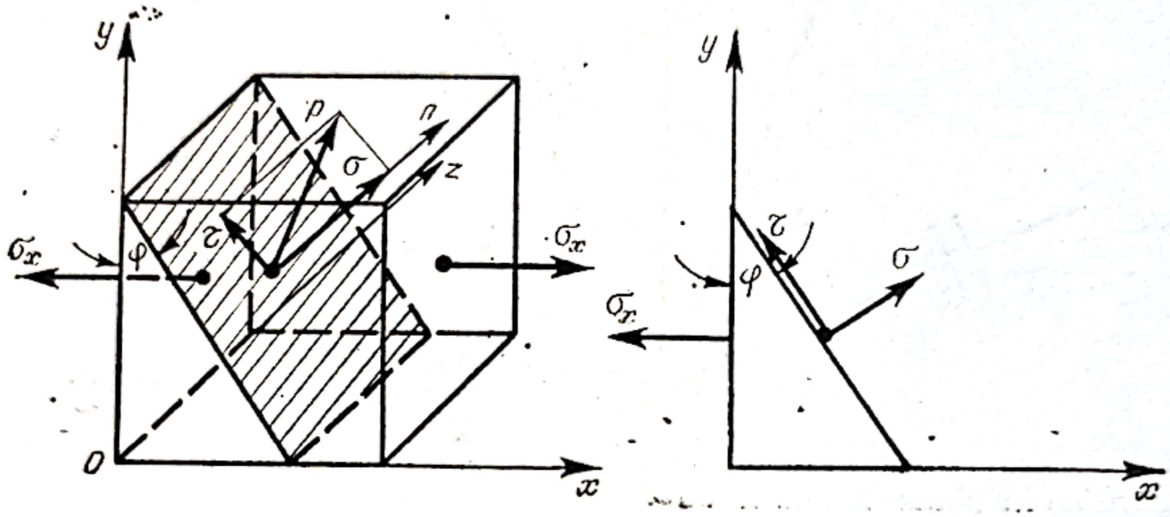


Fig. 1.9.

faţă de direcţiile principale ($\sigma_x = \sigma_1$) şi se cere să se determine valoarea tensiunilor σ şi τ în secţiuni înclinate

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_x}{2}\cos 2\varphi$$

$$\tau = -\frac{\sigma_x}{2}\sin 2\varphi. \qquad (1.14)$$

Tensiunea tangenţială maximă este

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{\sigma_x}{2} \qquad (1.15)$$

şi are loc în secţiuni înclinate cu $\varphi = 45°$.

1.2.5. DETERMINAREA PE CALE GRAFICĂ A VARIAŢIEI TENSIUNILOR ÎN JURUL UNUI PUNCT. CERCUL LUI MOHR

a) **Cazul stării plane de solicitare** (fig. 1.10). Dacă se cunosc tensiunile σ_x, σ_y şi τ_{xy} pot fi determinate tensiunile σ şi τ pe o secţiune înclinată şi pe cale grafică utilizînd cercul lui Mohr.

Scanned with OKEN Scanner

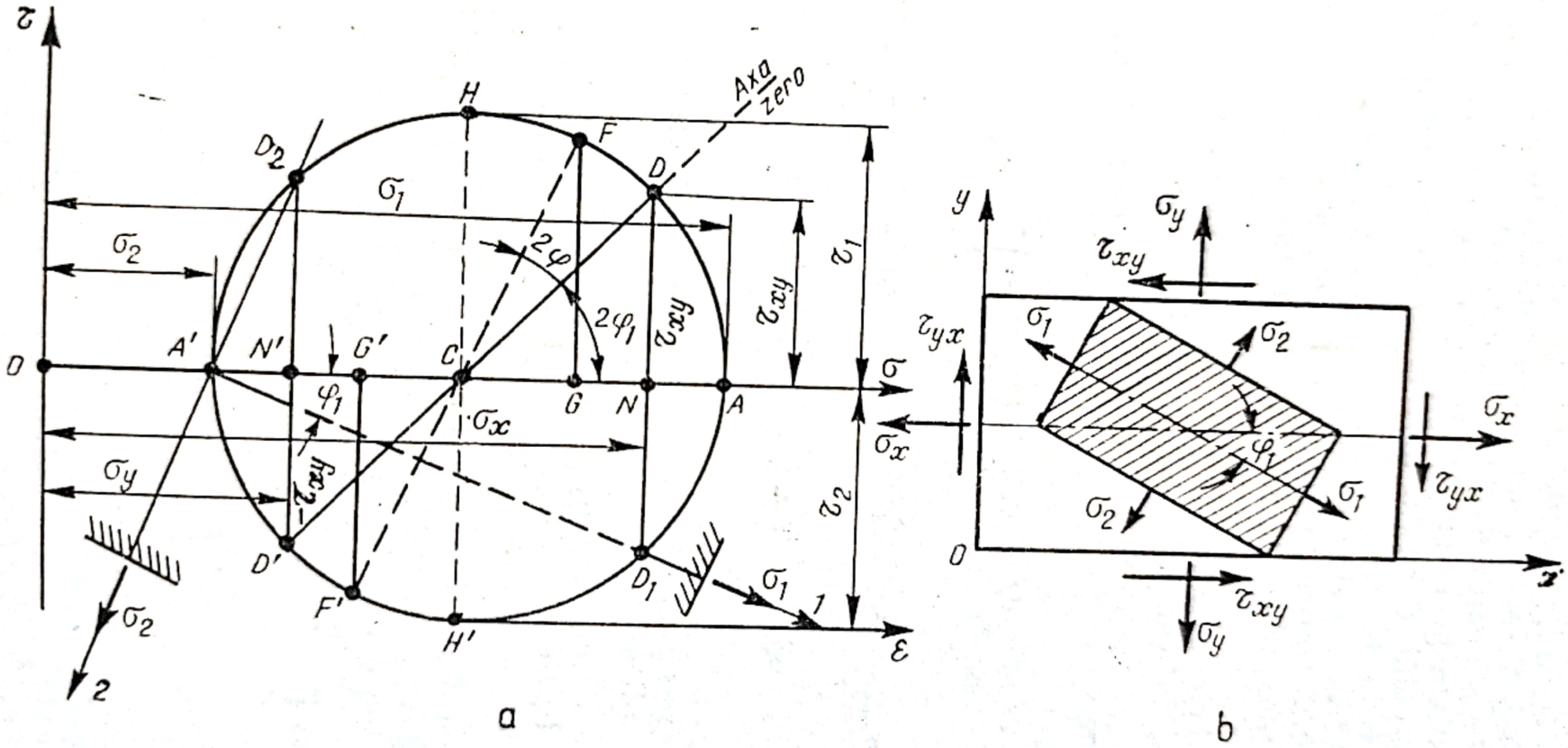

τ
H
Axa zero
F
D
D2
σ1
σ2
2φ
2φ1
τxy
σ1
A'
N'
G'
C
O
φ1
σx
G
N
A
σ
σx
σy
τxy
D'
D1
F'
H'
σ1
1
σ2
2
ε
a
y
σy
τxy
τyx
σ1
σ2
σx
φ1
σ1
τyx
σ2
O
x
τxy
σy
b

Fig. 1.10.

Trasarea acestui cerc se face astfel:

Pe axa $O\sigma$ (orizontală) se măsoară, la o scară aleasă, segmentul $ON = \sigma_x$ și $ON' = \sigma_y$. Pe o perpendiculară ridicată în punctul N pe $O\sigma$ se măsoară $ND = \tau_{xy}$, iar în punctul N' se măsoară $C'D' = -\tau_{xy}$. Punctele D și D' sînt situate pe cercul lui Mohr la capetele aceluiași diametru. Deci centrul cercului C se va găsi la intersecția cu axa $O\sigma$ a diametrului DD'.

Cercul avînd raza $CD = CD'$ intersectează axa $O\sigma$ în punctele A și A', care reprezintă starea de tensiune de pe planele principale. Punctul A are abscisa maximă ($OA = \sigma_1$), iar punctul A' are abscisa minimă ($OB = \sigma_2$).

Pentru ambele puncte $\tau_{xy} = 0$. Se observă că valorile tensiunilor maxime σ_1 și σ_2 sînt cele date de relația (1.9) și anume

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = OA = OC + CA = OC + \sqrt{CN^2 + ND^2} =$$

$$= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = OA' = OC - CA' = OC - \sqrt{CN'^2 + D'N'^2} =$$

$$= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}.$$

În ce privește direcțiile principale, se observă pe fig. 1.10,a că unghiul DCA este $2\varphi_1$, adică

$$\operatorname{tg} \widehat{DCA} = -\frac{DN}{CN} = -\operatorname{tg} 2\varphi_1 = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

unghiul este negativ deoarece arcul AD trebuie măsurat în sens invers sensului pozitiv trigonometric. Direcția CD poartă numele de *axă de unghi zero*, deoarece toate unghiurile se măsoară începînd de la această axă.

Valorile tensiunilor tangențiale maxime sînt date de punctele H și H' de pe cercul lui Mohr, fiind egale cu raza cercului, deci:

$$\tau_{1,2} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xx}^2} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

adică valoarea dată de relația (1.11).

Se observă din fig. 1.10, a, că secțiunile în care tensiunile tangențiale sînt maxime sau minime (τ_1 și τ_2) fac cu planele principale un unghi de 45°.

În cazul unei secțiuni oarecare, înclinată cu unghiul φ față de axa Oy (fig. 1.6), coordonatele punctului F (fig. 1.10, a) sînt tensiunile corespunzătoare secțiunii considerate ($OG = \sigma_x$; $OG' = \sigma_y$ și $FG = \tau_{xy}$). Unghiul

Scanned with OKEN Scanner

2φ trebuie luat de la axa de unghi zero, în sens trigonometric dacă φ este pozitiv.

Dacă la trasarea cercului lui Mohr, axa tensiunilor σ a fost luată paralelă cu axa Ox a elementului de volum considerat (fig. 1.10, b). Pentru a determina poziția, pe cale grafică a direcției lui σ_1 (1) este suficient să se determine pe cerc simetricul, D_1, față de axa Ox al punctului D. Dreapta $A'D_1$ dă direcția lui σ_1. Direcția lui σ_2(2) este dreapta $A'D_2$ perpendiculară pe $A'D'$. Direcția lui σ_1 din fig. 1.10, b este paralelă cu direcția (1) iar a lui σ_2 paralelă cu dreapta (2).

Dacă se cunosc valorile tensiunilor principale σ_1 și σ_2, cercul lui Mohr se construiește după cum urmează (fig. 1.11, a).

Se alege un sistem de axe rectangulare avînd drept coordonate σ în abscisă și τ în ordonată. Se măsoară pe axa $O\sigma$, la scara aleasă, segmentele $OA = \sigma_1$ și $OA' = \sigma_2$. Se construiește cercul cu diametrul AA'. Pornind de la linia CA se măsoară unghiul 2φ față de rază, în același sens cu unghiul φ din fig. 1.11, b, și se obține punctul D. Coordonatele acestui punct reprezintă, la scara aleasă, tensiunile σ și τ de pe planul înclinat AB. Tensiunea tangențială maximă este egală cu raza cercului, adică

$$\tau_{1,2} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.$$

b) **Cazul stării liniare de tensiune.** Construcția cercului lui Mohr în cazul stării liniare de tensiune este similară cu cea prezentată mai sus — cu mențiunea că $\sigma_2 = 0$, deci cercul trece prin origine.

Tensiunile σ și τ dintr-o secțiune înclinată AB (fig. 1.13), sînt date de coordonatele punctului D (fig. 1.12).

c) **Cazul stării spațiale de tensiune.** Se consideră elementul de volum din fig. 1.4 orientat față de direcțiile principale ($\sigma_x = \sigma_1$, $\sigma_y = \sigma_2$ și $\sigma_z = \sigma_3$), pentru care se cunosc tensiunile principale σ_1, σ_2 și σ_3 (fig. 1.14).

Tensiunile pe o secțiune înclinată ABC, avînd normala n înclinată cu unghiurile α β și γ față de aceste direcții pot fi determinate, pe cale grafică, tot cu ajutorul cercului lui Mohr, după cum urmează:

Pe axa $O\sigma$ se iau punctele A, B și C și se trasează trei cercuri avînd diametrele AB, BC și AC cu centrele în O_1, O_2 și O_3 ($OA = \sigma_1$, $OB = \sigma_2$ și $OC = \sigma_3$).

În punctul A se trasează perpendiculara AN pe axa $O\sigma$ apoi se trasează dreapta AP_1 făcînd unghiul α cu dreapta AN. Aceasta intersectează cele două cercuri care trec prin punctul A, în punctele P_1 și P_1'.

Se construiește un arc de cerc cu centrul în O_2 și cu raza $O_2P_1 = O_2P_1'$. Aceeași construcție se face cu centrul în O_1 măsurînd unghiul γ și trasînd cercul cu razele $O_1P_2 = O_1P_2'$. Tensiunile σ și τ de pe secțiunea înclinată ABC (fig. 1.14) sînt date, la scara aleasă, de coordonatele punctului R de intersecție al celor două arcuri de cerc. Pentru verificare se recomandă a se face o construcție similară plecînd de la punctul B, cu unghiul β; arcul de cerc cu raza O_3P_3 trebuie să treacă tot prin punctul R.

Scanned with OKEN Scanner

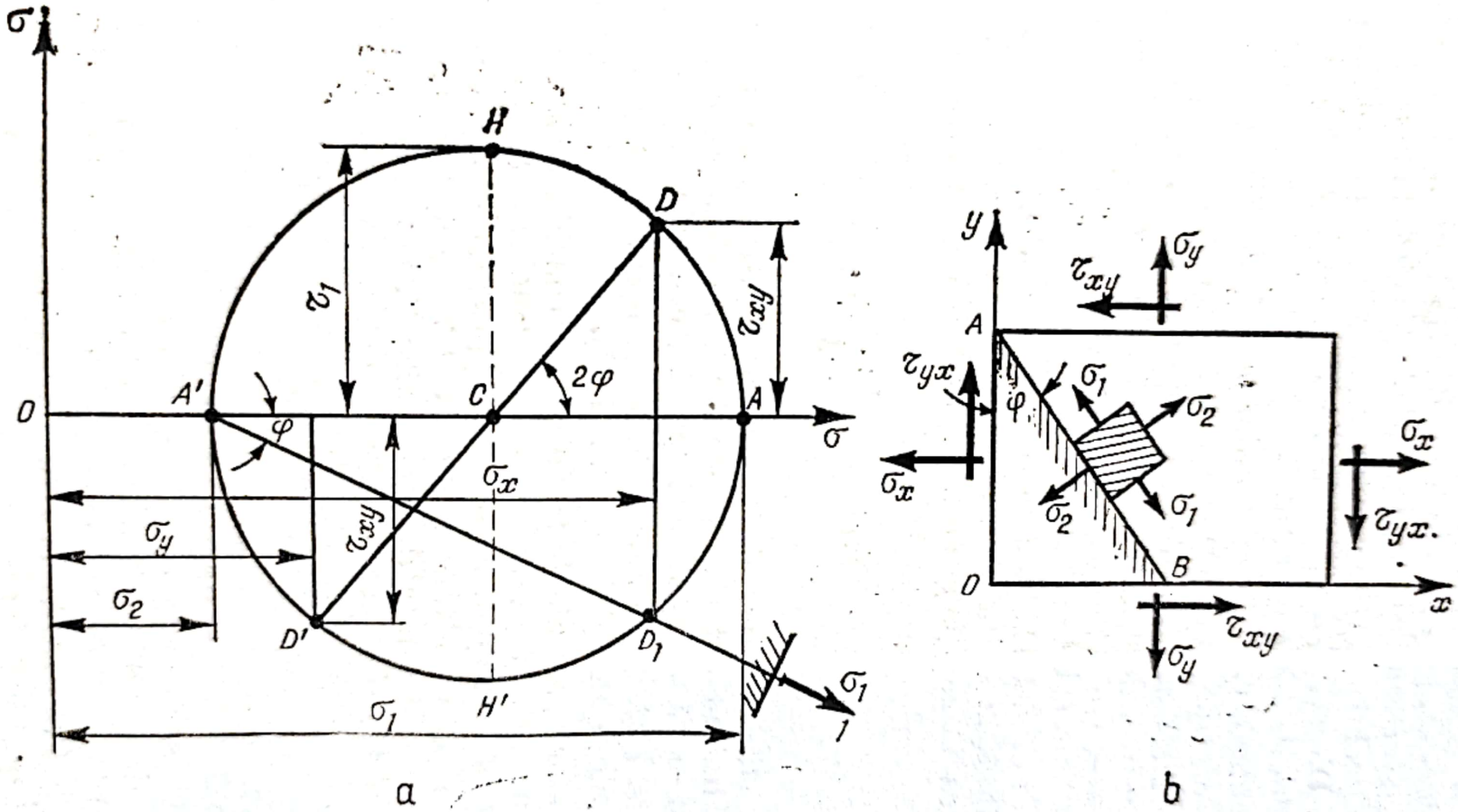


Fig. 1.11

Scanned with OKEN Scanner

Orice punct situat pe suprafața cuprinsă între cele trei cercuri (suprafața haşurată) sau pe conturul acestora reprezintă o stare posibilă

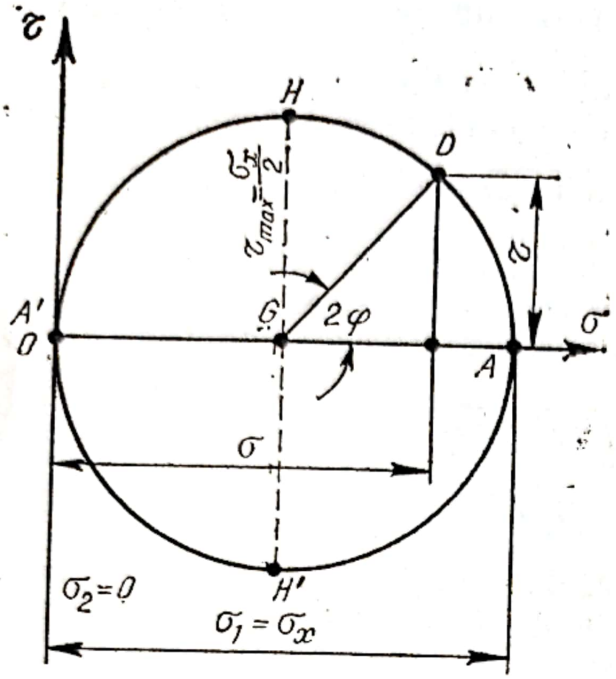


Fig. 1.12.

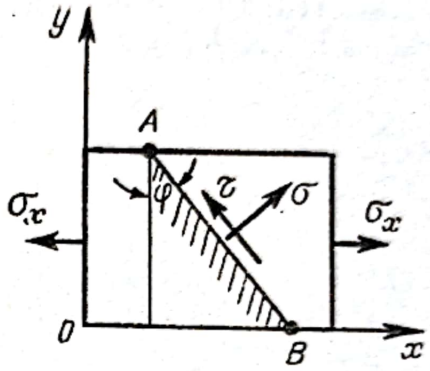


Fig. 1.13.

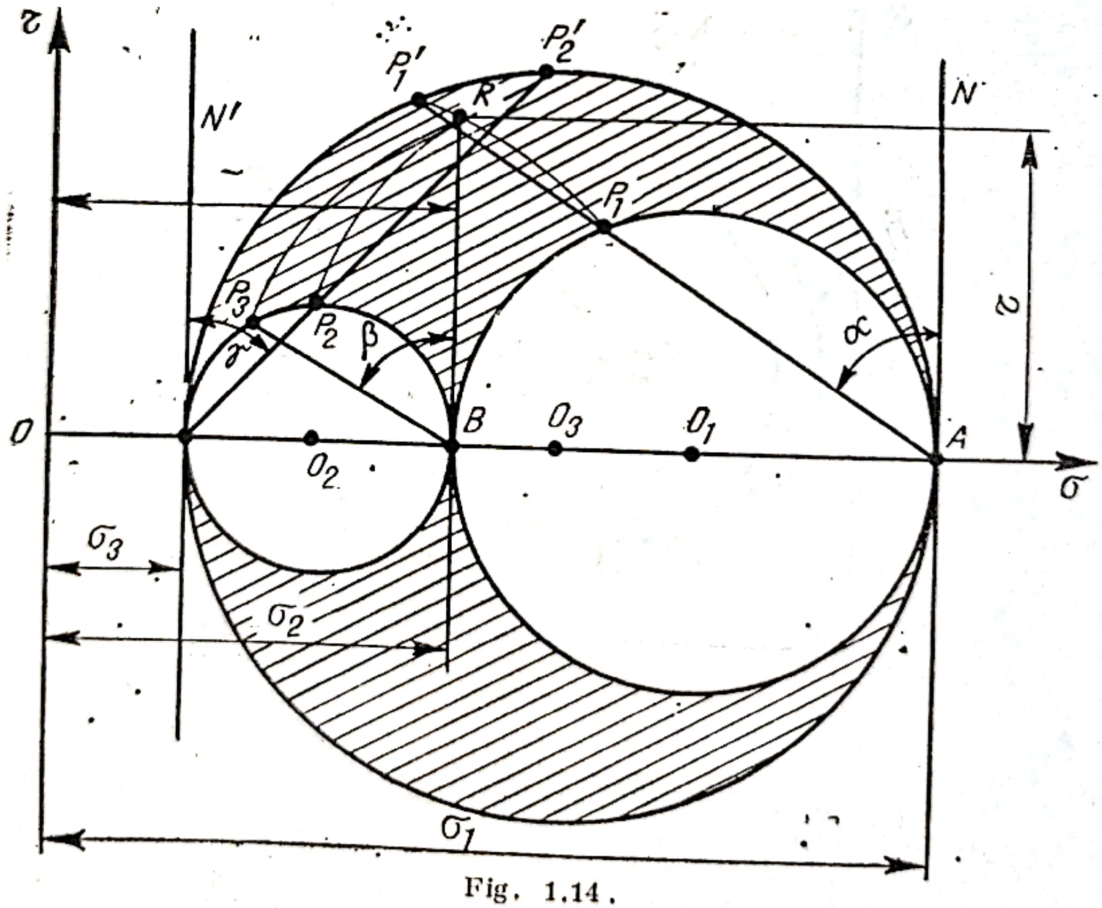


Fig. 1.14.

de tensiune corespunzătoare unor valori determinate ale cosinusurilor directoare ce caracterizează poziția secțiunii înclinate ABC (fig. 1.14).

Scanned with OKEN Scanner

1.3. DEFORMAȚII ȘI DEPLASĂRI

1.3.1. RELAȚIILE DE LEGĂTURĂ ÎNTRE DEFORMAȚII ȘI DEPLASĂRI

a) **Cazul stării spațiale de tensiune.** Deformațiile sînt caracterizate de variația distanței dintre două puncte oarecare P și Q ale solidului considerat, cînd acestuia i se aplică sarcini exterioare. Vectorul $\overrightarrow{PQ}$, devine după deformație un vector $\overrightarrow{P'Q'}$.

Raportul dintre creșterea algebrică a lungimii vectorului $\overrightarrow{PQ}$ și lungimea sa inițială reprezintă deformația sau *lungirea specifică* (fig. 1.15).

$$\varepsilon = \frac{\overrightarrow{P'Q'} - \overrightarrow{PQ}}{\overrightarrow{PQ}}. \tag{1.16}$$

Dacă $P'Q' - PQ$, este negativ, deformația se numește *scurtare specifică*. În acest caz materialul, în punctul considerat, este supus la compresiune.

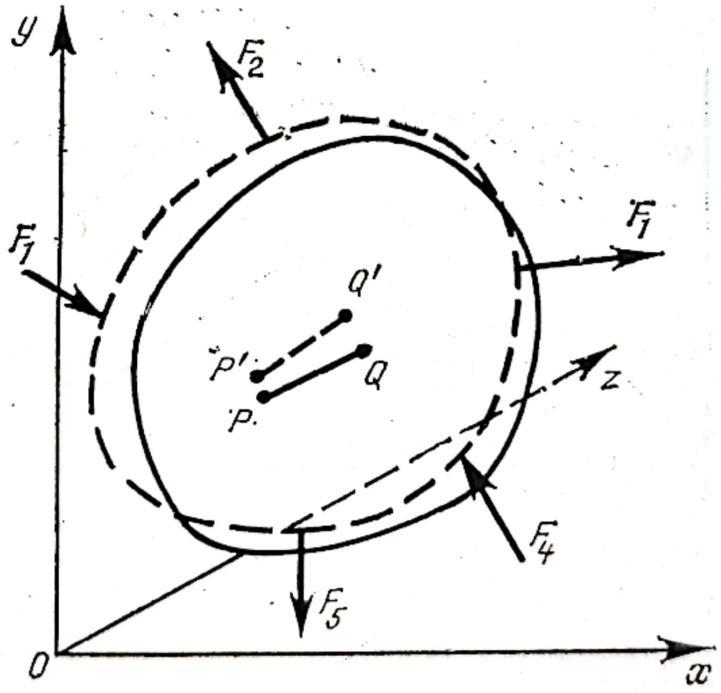


Fig. 1.15.

Tensiunile tangențiale produc deformația unghiurilor. Unghiul γ cu care se modifică unghiul de 90° sub efectul lui τ se numește *lunecare specifică*. Dacă γ reprezintă o scădere a unghiului cu $\frac{\pi}{2}$ lunecarea specifică se consideră pozitivă și invers.

Scanned with OKEN Scanner

Cît timp tensiunile au valori inferioare limitei de elasticitate, deformaţiile sînt mici şi reversibile. La fel şi deplasările particulelor din interiorul corpurilor sub acţiunea solicitărilor.

Elementul de volum considerat în fig. 1.16, de exemplu, va suferi mici deplăsări datorită deformărilor celorlalte elemente ale corpului, precum şi deformării proprii. Componentele deplasărilor în direcţiile axelor Ox, Oy şi Oz se notează cu u, v şi w şi se consideră că ele variază în mod continuu, în interiorul corpului, adică sînt funcţii continue de x, y şi z.

Se consideră că elementul de volum paralelipipedic $\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}z$ a suferit deformaţii şi o deplasare cu componentele u, v şi w corespunzătoare punctului

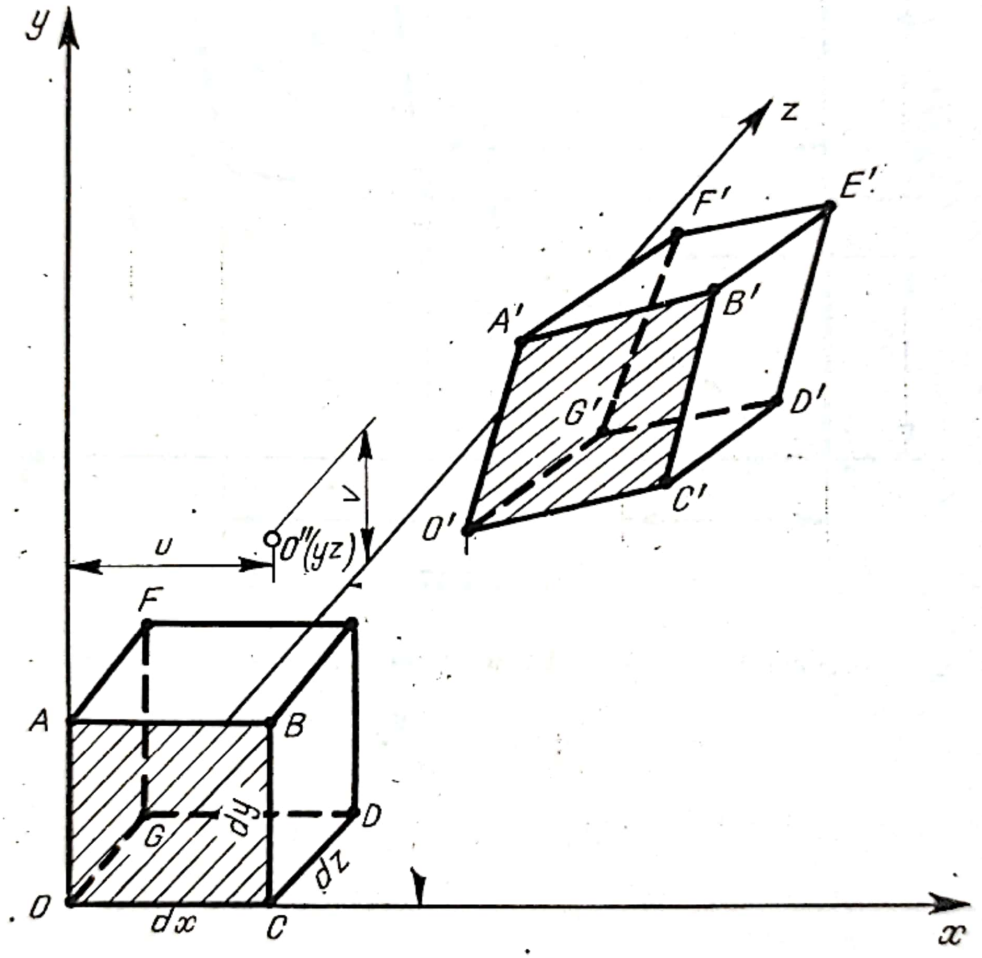


Fig. 1.16.

O ajuns în O', datorită căreia punctul O se proiectează în planul xOy într-un punct O'' (fig. 1.17). Se admite că, datorită deformărilor elementului de volum, faţa $ABCO$ are ca proiecţie, în acelaşi plan, patrulaterul $O''A''B''C''$. Deplasreaa totală a punctului C măsurată în direcţia axei Ox este : $u + \dfrac{\partial u}{\partial x}\,\mathrm{d}x$. Diferenţa dintre deplasările, în direcţia Ox ale punctelor O şi C este tocmai lungirea $\Delta\mathrm{d}x$ a segmentului OC a cărui lungime iniţială era $\mathrm{d}x$; deci;

$$\Delta\mathrm{d}x = u + \frac{\partial u}{\partial x}\,\mathrm{d}x - u = \frac{\partial u}{\partial x}\,\mathrm{d}x.$$

Scanned with OKEN Scanner

Lungirea specifică în direcţia Ox, corespunzătoare punctului O, este

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}. \tag{1.17}$$

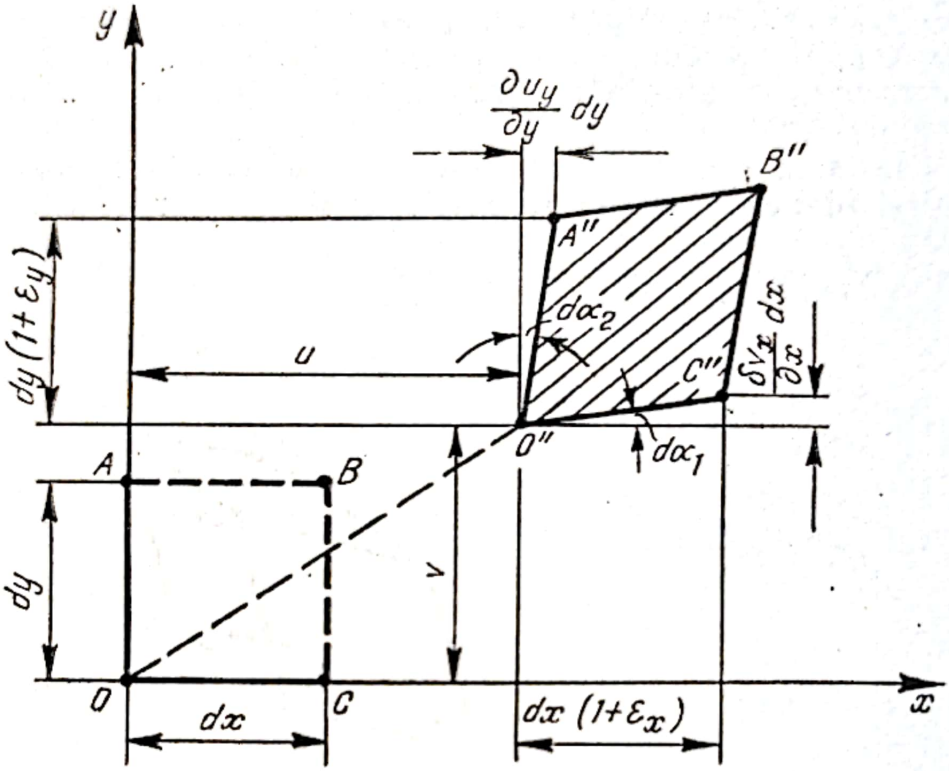


Fig. 1.17

Analog, lungirile specifice după direcţiile Oy şi Oz sînt

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}. \tag{1.18}$$

În ce priveşte deformaţiile unghiulare, din fig. 1.17 se observă că deplasarea punctului C, măsurată în direcţia Oy este $v + \frac{\partial v}{\partial x} dx$, iar a punctului A, în direcţia Ox este $u + \frac{\partial u}{\partial y} dy$.

După deformare poziţia segmentului de dreaptă $O''C''$ este înclinată în raport cu axa Ox cu unghiul α; $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\partial v}{\partial x}$ iar poziţia segmentului $O''A''$ este înclinată în raport cu axa Oy cu unghiul β; $\operatorname{tg} \beta = \frac{\partial u}{\partial y}$

Ca urmare unghiul AOC, iniţial de 90°, s-a micşorat cu

$$\alpha + \beta = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

care reprezintă lunecarea specifică în planul xOy, deci

$$\gamma_{xy}=\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}. \tag{1.19}$$

Analog, lunecările specifice în celelalte două plane de referință sînt

$$\gamma_{yz}=\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial z}$$
$$\gamma_{zx}=\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}. \tag{1.19}$$

Cele şase componente ale deformaţiilor specifice, ε_x, ε_y, ε_z, γ_{yz}, γ_{yz} şi γ_{zx}, definite prin relaţiile de mai sus, caracterizează, în întregime, starea de deformaţii dintr-un punct oarecare. Cu ajutorul lor se poate calcula lungirea specifică în orice direcţie ce trece prin punctul considerat, precum şi lunecarea specifică corespunzătoare.

Starea de deformaţie din jurul unui punct putînd fi reprezentată printr-un tensor, analog cu tensorul tensiunilor, toate relaţiile privind: deformaţiile pe o direcţie oarecare, deformaţiile specifice principale, lunecările specifice maxime etc. pot fi stabilite din relaţiile date la paragraful 1.2.4, unde se înlocuieşte tensiunea normală cu lungirea specifică (de exemplu, σ_x cu ε_x) şi tensiunea tangenţială cu jumătate din lunecarea specifică $\left(\text{de exemplu, } \tau_{xy} \text{ cu } \frac{1}{2}\gamma_{xy}\right)$ aşa cum se va vedea mai jos.

1.3.2. VARIAŢIA DEFORMAŢIILOR ÎN JURUL UNUI PUNCT

a) **Cazul stării plane de deformaţie.** Un element de volum se poate deforma — cum s-a văzut mai sus — după toate direcţiile (starea spaţială de deformaţii). Dacă deformaţiile după una din direcţii este împiedicată (fig. 1.18) starea de deformaţii este plană: toate deformaţiile se produc numai în direcţiile paralele cu acelaşi plan. Se menţionează că tensiunile, după direcţia în raport cu care deformaţiile sînt împiedicate, pot fi diferite de zero, ca urmare unei stări plane de deformaţii îi poate corespunde o stare de tensiuni spaţială, şi invers.

Lungirea specifică ε_φ pe o direcţie oarecare din planul xOy, făcînd un unghi oarecare φ cu axa Ox este

$$\varepsilon_\varphi=\frac{1}{2}(\varepsilon_x+\varepsilon_y)+\frac{1}{2}(\varepsilon_x-\varepsilon_y)\cos 2\varphi+\frac{1}{2}\gamma_{xy}\sin 2\varphi. \tag{1.20 a}$$

Lunecarea specifică, adică variaţia unghiului între două direcţii normale înainte de deformare, se obţine cu relaţia

$$\gamma_{x'y'}=-(\varepsilon_x+\varepsilon_y)\sin 2\varphi+\gamma_{xy}\cos 2\varphi. \tag{1.20 b}$$

Scanned with OKEN Scanner

Lungirile specifice principale se obţin din relaţia

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}. \qquad (1.21)$$

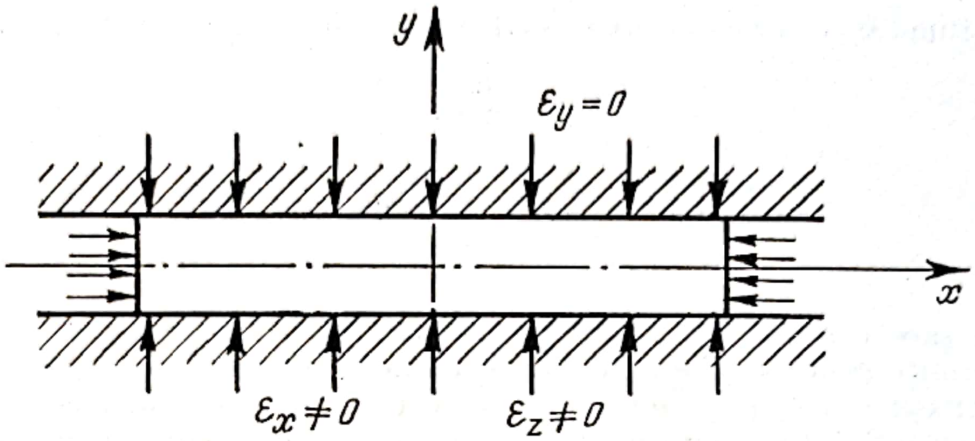


Fig. 1.18.

Direcţiile principale ale lungirilor specifice se stabilesc cu relaţia

$$\varphi_1 = \text{arc tg}\,\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}. \qquad (1.22)$$

b) **Cazul stării spaţiale de deformaţii.** Şi în cazul stării spaţiale de deformaţii legile de variaţie ale deformaţiilor specifice sînt perfect analoge cu cele ale variaţiei tensiunilor, ca urmare se pot enunţa următoarele:

1°. În orice punct al corpului solicitat există trei direcţii trirectangulare principale pentru care $\gamma = 0$ şi cărora le corespund trei lungiri specifice principale ε_1, ε_2 şi ε_3.

2°. Direcţiile principale de deformaţii coincid cu direcţiile principale de tensiuni.

3°. În planele bisectoare direcţiilor principale lunecările specifice au valorile extreme şi sînt date de relaţiile

$$\gamma_1 = \varepsilon_2 - \varepsilon_3;\ \gamma_2 = \varepsilon_3 - \varepsilon_1 \text{ şi } \gamma_3 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2.$$

1.3.3. REPREZENTAREA GRAFICĂ A STĂRII PLANE DE DEFORMAŢII. CERCUL LUI MOHR PENTRU DEFORMAŢII

În sistemul rectangular de coordonate (fig. 1.19), starea plană de deformaţii, corespunzătoare unui punct P, poate fi reprezentată printr-un singur punct cu abscisa ε şi ordonata $\frac{\gamma}{2}$ $\left(\text{axa pozitivă } \frac{\gamma}{2} \text{ fiind îndreptată în jos}\right)$.

În fig. 1.19 punctul D corespunde unei lungiri specifice $\varepsilon = 500 \cdot 10^{-6}$ şi unei lunecări specifice $\gamma = 600 \cdot 10^{-6}$ radiani.

Scanned with OKEN Scanner

Cu un cerc Mohr, analog cercului din fig. 1.10, a, se pot determina lungirile specifice principale şi lunecarea specifică maximă pentru o secţiune oarecare, dacă se cunosc lungirile specifice ε_x şi ε_y după două direcţii

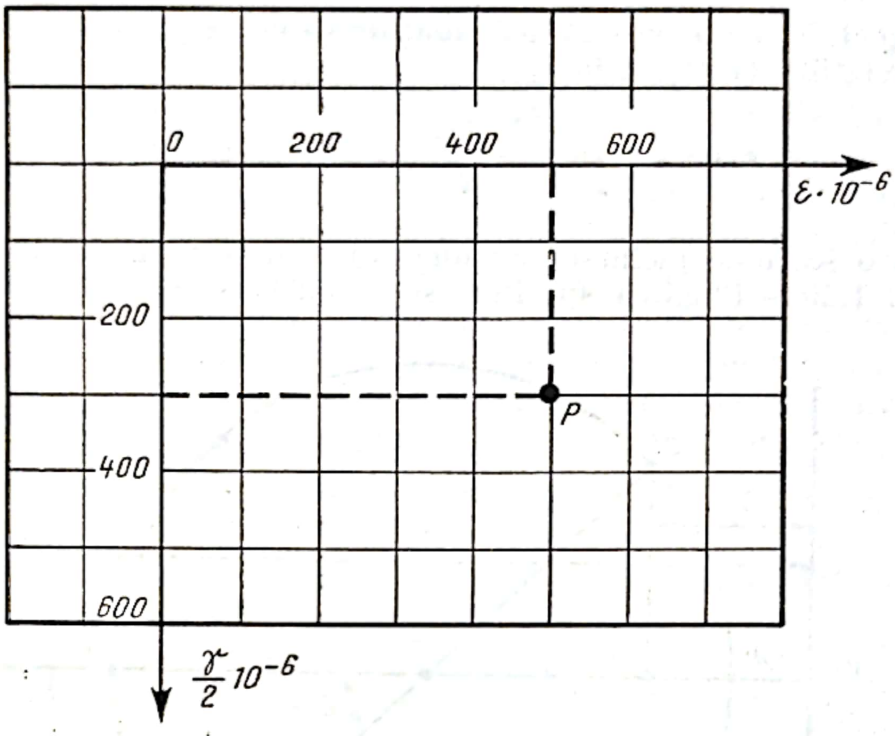


Fig. 1.19.

rectangulare (ce au originea în punctul considerat) şi lunecarea specifică γ_{xy} (fig. 1.20).

Punctul D corespunde lui ε_x şi $\frac{\gamma_{xy}}{2}$, iar punctul D' corespunde lui ε_y şi $-\frac{\gamma_{xy}}{2}$.

Linia care uneşte punctele D şi D' este diametrul cercului lui Mohr pentru deformaţii. Punctele situate pe acest cerc determină starea de deformaţie în punctul considerat.

Deformaţiile specifice principale ε_1 şi ε_2 corespund punctelor A şi A' de intersecţii a cercului cu axa $O\varepsilon$, deoarece pentru aceste puncte lunecarea specifică γ este nulă.

Cercul lui Mohr are raza

$$R = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}. \qquad (1.23)$$

Direcţiile deformaţiilor principale se determină cu relaţia (1.22), adică

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}.$$

Din fig. 1.20 se observă că deformaţiile specifice principale au valorile date de relaţiile (1.21), adică

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}$$

iar pentru o secţiune înclinată cu unghiul φ faţă de axa Oy — punctul D din fig. 1.20 — lungirea specifică se calculează cu relaţia (1.20 a).

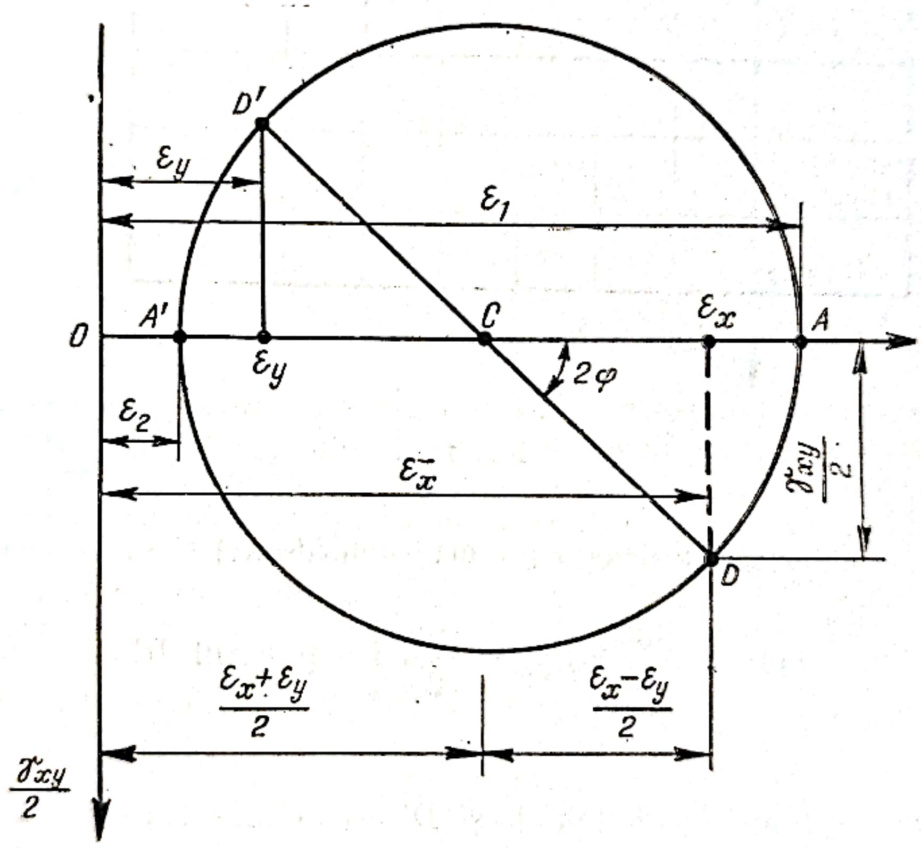


Fig. 1.20.

1.4. RELAŢIILE DINTRE TENSIUNI ŞI DEFORMAŢIILE SPECIFICE

1.4.1. CAZUL STĂRII LINIARE DE TENSIUNE

S-a subliniat mai sus că tensiunea nu este o mărime fizică, ci una derivată. Ea nu poate fi determinată direct ci, fie calculînd raportul dintre forţa aplicată şi aria secţiunii transversale, în cazul solicitării axiale,

Scanned with OKEN Scanner

fie din examinarea deformaţiilor şi a repartiţiei acestora pe secţiune, în cazul încovoierii şi torsiunii. Deformaţia lungimii, care însoţeşte tensiunea normală, este o mărime de bază accesibilă pentru măsurarea directă. Deformaţia unghiulară (lunecarea specifică), care însoţeşte tensiunea tangenţială, poate fi, de asemenea, măsurată, însă cu dificultăţi mai mari.

Trecerea de la deformaţiile specifice la tensiuni este complicată datorită efectului dat de contracţia transversală. Astfel, o dată cu deformaţia liniară specifică ε_x (deformaţie primară), care se produce după direcţia x de acţionare a forţei, iau naştere şi deformaţii secundare ε_y şi ε_z după direcţiile y şi z, perpendiculare pe x, fără să fie însoţite de apariţia tensiunilor (eforturilor unitare) după aceste direcţii.

În cazul solicitărilor de întindere sau compresiune, deformaţia primară se traduce în tensiune pe baza legii de proporţionalitate a lui Hooke. În acest caz, în direcţia forţei aplicate, apare tensiunea $\sigma = \varepsilon E$, în ipoteza că n-a fost depăşită limita de proporţionalitate a materialului.

În toate celelalte direcţii, această relaţie nu este aplicabilă, din cauza deformaţiilor transversale.

În fig. 1.21 este arătată variaţia lungirii specifice şi a tensiunii într-un punct oarecare, în cazul unei bare solicitate la întindere.

Scările radiale pentru deformaţie şi tensiune sînt astfel alese, încît să se obţină aceeaşi lungime a vectorilor în direcţia solicitării. Din figură se vede că relaţia dintre tensiune şi deformaţie (lungirea specifică) variază cu schimbarea unghiului de măsurare. Deci, dacă relaţia $\sigma = E\varepsilon$ este valabilă în direcţia sarcinii ea nu este valabilă şi în alte direcţii. Pentru $\alpha = 60°$ se observă că tensiunea are o mărime observabilă, însă, lungirea specifică este aproape nulă. Pentru $\alpha = 90°$, pentru care tensiunea este nulă, lungirea specifică este egală cu $-\mu\varepsilon$.

Deci valoarea absolută a lungirii specifice într-o direcţie oarecare, în cazul general, se poate considera ca fiind compusă din trei părţi separate :

— deformaţia primară, care este direct legată de tensiune prin legea lui Hooke ;

— deformaţia care ia naştere în direcţie transversală ;

— deformaţia produsă de variaţia temperaturii.

În cazul solicitării după două direcţii, legătura dintre tensiunea σ şi deformaţia specifică ε este arătată în fig. 1.22.

Din figură rezultă că direcţiile după care apar valorile maximă şi minimă al tensiunii sînt perpendiculare ; la fel în cazul deformaţiilor. Direcţiile lungirilor specifice principale coincid cu direcţiile tensiunilor principale şi planele în care ele acţionează sînt plane principale. Particularitatea esenţială a acestor plane, după cum s-a arătat, constă în aceea că în ele tensiunile tangenţiale sînt nule.

Scanned with OKEN Scanner

Din fig. 1.21 și 1.22 rezultă că, cu excepția unui singur caz particular, amintit, nu există proporționalitate simplă între tensiuni și deformațiile specifice.

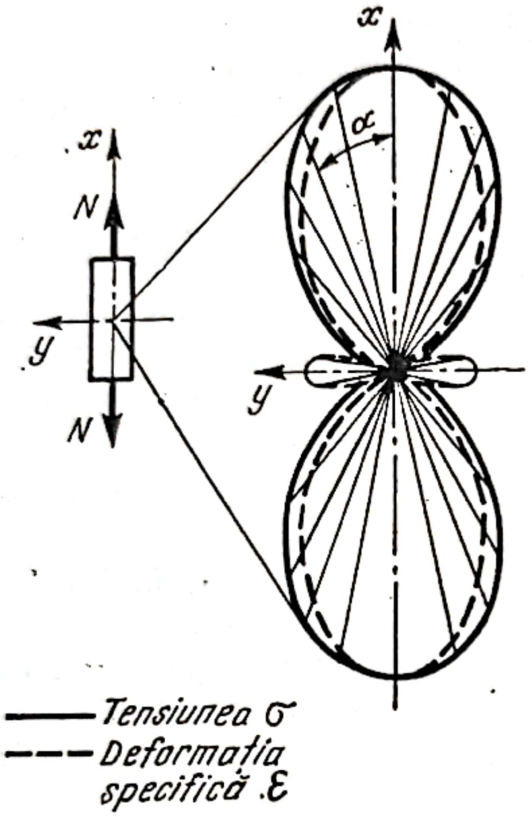


Fig. 1.21.

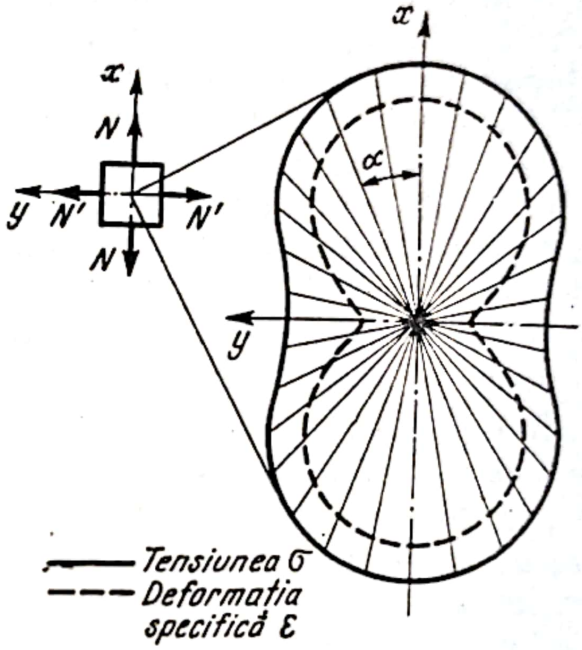


Fig. 1.22.

1.4.2. CAZUL STĂRII SPAȚIALE DE TENSIUNE.

În practică, de regulă, este necesară cunoașterea tensiunilor principale și de aceea se pune problema stabilirii relațiilor dintre deformațiile specifice măsurate și tensiunile principale. Pentru aceasta se determină mai întîi relațiile dintre tensiunile principale și deformațiile specifice principale corespunzătoare. De exemplu, în cazul unui cub cu latura de 1 cm solicitat la întindere în direcția x (fig. 1.23), deformația în direcția x va fi $\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$, iar în direcțiile y și z $\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\mu \frac{\sigma_y}{E}$.

Pentru solicitarea în direcția y, rezultă $\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$, și $\varepsilon_z = \varepsilon_x = -\mu\frac{\sigma_y}{E}$, iar pentru solicitarea în direcția z, rezultă $\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$ și $\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\mu\frac{\sigma_z}{E}$.

Dacă cele trei solicitări sînt aplicate simultan, deformația specifică în orice direcție se determină prin adunarea algebrică a mărimilor determinate pentru fiecare solicitare, acționînd separat, deci

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)];\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_y)];\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \qquad (1.24)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)];\ \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

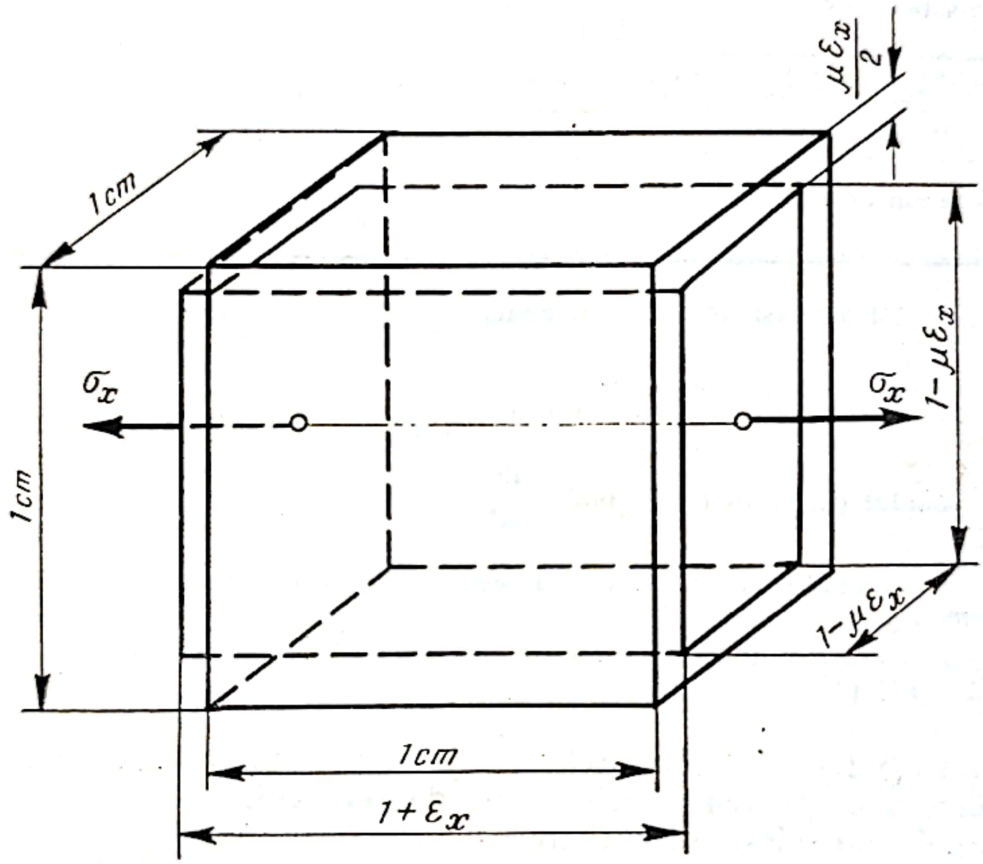


Fig. 1.23

Aceste relații exprimă legea lui Hooke generalizată.

Dacă în planele alese nu există tensiuni tangențiale ($\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$) tensiunile normale și deformațiile specifice vor fi principale.

Utilizînd relațiile de mai sus, ***deformația volumică*** specifică se poate exprima în funcție de tensiunea medie

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\varepsilon_v = 3\varepsilon_m = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{1-2\mu}{E} 3\sigma_m = \frac{\sigma_m}{K}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde K, este modulul de elasticitate cubică.

În tabelul 1.1 se dau relaţiile între constantele elastice ale materialelor (E, G, μ şi K).

Tabelul 1

Relaţile dintre constantele elastice

Constanta elastică exprimată în funcţie de	E, μ	E, G	μ, G
Modulul de elasticitate E	E	E	$2(1+\mu)G$
Modulul de elasticitate G	$\frac{E}{2(1+\mu)}$	G	G
Modulul de elasticitate cubică K	$\frac{E}{3(1-2\mu)}$	$\frac{EG}{3(3G-E)}$	$\frac{2(1-\mu)G}{3(1-2\mu)}$
Coeficientul de contracţie transversală μ	μ	$E(2G-1)$	μ

E — modulul de elasticitate longitudinală $\frac{daN}{cm^2}$

G — modulul de elasticitate transversală $\frac{daN}{cm^2}$

K — modulul de elasticitate cubică $\frac{daN}{cm^2}$

$\mu = \frac{1}{m}$ — coeficientul lui Poisson (de contracţie transversală)

Valorile acestor constante pentru diferite materiale utilizate în construcţii sînt date în lucrările [13] [17] [20]

În tabelul 1.2. sînt date relaţiile pentru calculul tensiunilor pe suprafeţe înclinate, pentru diferite stări de tensiuni.

În tabel s-au folosit următoarele notaţii :

— tensiunea medie $\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$;

— lungirea specifică medie $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3}$;

— deformaţia specifică de volum $\varepsilon_v = 3 \cdot \varepsilon_m$

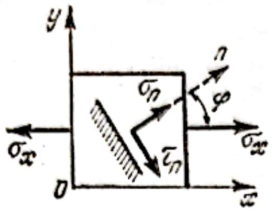
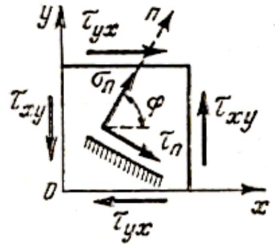
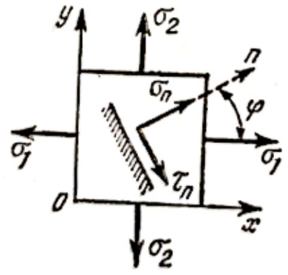
— modulul de elasticitate cubică $K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$.

Formulele pentru tensiunile principale σ_1, σ_2 şi σ_3 şi pentru lungirile specifice principale corespunzătoare, în cazurile 3...5 din tabelul 1.2, se obţin înlocuind în expresiile lui σ şi ε indicii x, y şi z cu 1, 2, 3 şi anulînd totodată termenii care conţin pe τ şi γ.

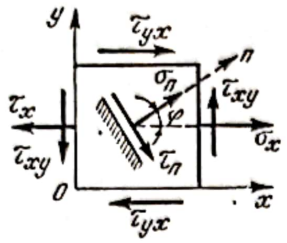
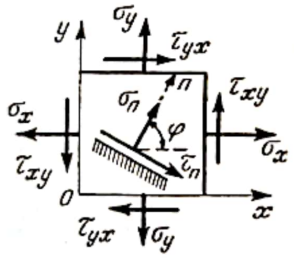
Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.2

Relațiile pentru calculul tensiunilor pe suprafețe plane înclinate, pentru diferite stări de tensiuni

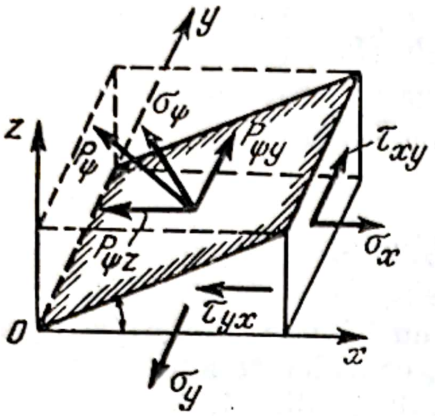
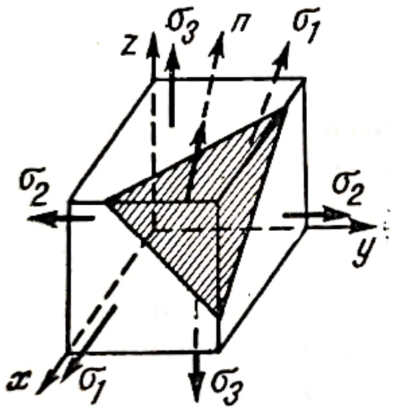
1.	Stare liniară de tensiuni 	$\sigma_n = \sigma_x \cos^2\varphi$ $\tau_n = \frac{1}{2}\sigma_x \sin 2\varphi$ (1) Tensiunile tangențiale maxime și minime: $\tau_{1,2} = \pm \frac{1}{2}\sigma_x$ (2) (acționează pe suprafețele ale căror normale fac un unghi de 45° sau 135° cu direcția Ox).
2.	Stare plană de tensiuni. Forfecare pură 	$\sigma_n = \tau_{xy} \sin 2\varphi$ (3) Tensiunile normale maxime și minime $\sigma_1 = \tau_{xy}$; $\sigma_2 = -\tau_{xy}$ (pentru $\varphi_1 = 45°$ și $\varphi_2 = 135°$) Tensiunile tangențiale maxime și minime: $\tau_{1,2} = \pm \tau_{xy}$ (pentru $\varphi_1 = 0°$ și $\varphi_2 = 90°$) (4)
3.	Stare plană de tensiuni Se cunosc tensiunile principale σ_1 și σ_2 	$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2\varphi + \sigma_2 \sin^2\varphi$ $\tau_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\varphi$ (5) Tensiunile tangențiale maxime și minime $\tau_{1,2} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ (6) (pentru $\varphi_1 = 45°$; și $\varphi_2 = 135°$) Pentru $\sigma_2 < 0$ valorile tensiunilor tangențiale sînt maxime și minime pentru plane perpendiculare pe planul figurii. Cînd $\sigma_2 > 0$ tensinile tangențiale maxime și minime se produc pe plane înclinate cu 45° față de planul după care au loc tensiunile principale și sînt egale cu $\tau_{1,2} = \pm \frac{\sigma_1}{2}$ (6a)

Scanned with OKEN Scanner

4.	Stare plană de tensiuni. Întindere sau compresiune şi forfecare (încovoiere cu forfecare) 	$\left.\begin{aligned}\sigma_n &= \frac{1}{2}\sigma_x(1+\cos 2\varphi)+\tau_{xy}\sin 2\varphi \\ \tau_n &= \frac{1}{2}\sigma_x \sin 2\varphi - \tau_{xy}\cos 2\varphi\end{aligned}\right\}$ (7) Tensiunile principale, pe plane normale la planul figurii $\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2}$ (8) Unghiurile $\varphi = \varphi_1$ şi $\varphi = \varphi_2$ care determină poziţia planelor principale, se obţin din formula $\operatorname{tg}\alpha_i = \frac{\sigma_i - \sigma_x}{\tau_{xy}}$ (9) unde $i = 1$ sau 2 Tensiunile tangenţiale maxime şi minime $\tau_{1,2} = \pm\frac{1}{2}\sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2}$ (10) acţionează pe suprafeţele ce fac un unghi de 45° cu planele principale.
5.	Stare plană de tensiuni. 	$\left.\begin{aligned}\sigma_n &= \frac{1}{2}(\sigma_x+\sigma_y)+\frac{1}{2}(\sigma_x - \\ &\quad -\sigma_y)\cos\varphi + \tau_{xy}\sin 4\varphi \\ \tau_n &= \frac{1}{2}(\sigma_x-\sigma_y)\sin\varphi - \tau_{xy}\cos 2\varphi\end{aligned}\right\}$ (11) Tensiunile principale pe plane normale la planul figurii : $\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$ (12) Unghiurile φ_1 şi φ_2 pentru planele principale se determină cu relaţia $\left.\begin{aligned}\operatorname{tg}\varphi_1 &= \frac{\sigma_x-\sigma_y}{\tau_{xy}} \\ \operatorname{tg}\varphi_2 &= \frac{\sigma_x-\sigma_x}{\tau_{xy}}\end{aligned}\right\}$ sau $\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x-\sigma_y}$ (31) Tensiunea tangenţială maximă şi minimă $\tau_{1,2} = \pm\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x^2-\sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$ (14) acţionează pe plane situate sub un unghi de 45° faţă de planele principale. În cazul cînd $\sigma_2 = 0$, tensiunea tangenţială maximă are loc pe planul care face un unghi de 45° cu planul tensiunilor principale şi are valoarea : $\tau_{1,2} = \pm\frac{\sigma_1}{2}$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.2 (continuare)

6.	Stare plană de tensiuni. Caz general 	Tensiunile pe planul paralel cu direcţia tensiunii σ_y şi înclinat cu un unghi ψ faţă de planul xy: $p_{\Psi x} = \sigma_x \sin \psi$ (15) $p_{\Psi x} = -\tau_{xy} \sin \psi$ (16) sînt situate în plane paralele cu planul xy $p_\Psi = \sqrt{p_{\Psi z}^2 + p_{\Psi y}^2} = \sqrt{\sigma_z^2 + \tau_{xy}^2} \cdot \sin \psi$ (17) Tensiunea normală $\sigma_\Psi = \sigma_x \sin^2 \psi$ (18) Tensiunea tangenţială $\tau = \sin \psi \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{2}(1 + \cos 2\psi) + \tau_{xy}^2}$ (19)
7.	Stare spaţială de tensiuni 	Se cunosc tensiunile principale normale şi tangenţiale: $\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 (n \cdot x) + \sigma_2 \cdot \cos^2 (n \cdot y) + \sigma_3 \cos^2 (n \cdot z)$ (20) $\tau_n = \sqrt{\sigma_1^2 \cdot \cos^2 (n, x) + \sigma_2^2 \cos^2 (n, y) + \sigma_3^2 \cos^2 (n, z) - [\sigma_1 \cdot \cos^2 (n, x) + \sigma_2 \cos^2 (n, y) + \sigma_3 \cos^2 (n, z)]^2}$ (21). Pe planul egal înclinat faţă de direcţiile celor trei tensiuni principale (plan octaedric) tensiunile normale şi tangenţiale sînt egale şi au expresiile $\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \sigma_m$ $\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ (22) $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} = \frac{2}{3}\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}$ (23) Valorile tensiunilor tangenţiale maxime $\tau_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \quad \tau_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}; \quad \tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ (24) Tensiunea tangenţială maximă τ_1 acţionează pe planul normal la cel de-al doilea plan principal care împarte în două unghiul diedru dintre primul şi al treilea plan principal.

1.4.3. CAZUL STĂRII PLANE DE TENSIUNI

a) **Direcțiile principale sînt cunoscute.** Pentru starea plană de tensiuni în relațiile (1.24) se înlocuiește $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{yz} = 0$ și rezultă

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y);\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x);\ \gamma_{xy} = 0 \qquad (1.25\ a)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_y);\ \gamma_{zx} = 0.$$

Determinarea tensiunilor σ_x și σ_y cu ajutorul lungirilor specifice ε_x și ε_y, măsurate după direcțiile Ox și Oy, considerate axe principale ($\tau_{xy} = 0$) se face cu următoarele relații rezultate din (1.25 a)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x). \qquad (1.25\ b)$$

Se observă că σ_x este funcție atît de ε_x cît și de ε_y; la fel și σ_y.

b) **Direcțiile principale nu sînt cunoscute.** Adeseori, în practică, nu sînt cunoscute direcțiile tensiunilor principale. În asemenea cazuri este necesar să se determine, în prealabil, lungirile specifice ε_φ, pe direcții oarecare, cu ajutorul relației (1.20 a) din care se observă că deformația ε_φ este funcție de lunecarea specifică γ_{xy} precum și de lungirile specifice ε_x și ε_y — deci relația are trei necunoscute, ca urmare este necesară măsurarea lungirilor specifice după trei direcții formînd unghiurile φ_1, φ_2 și φ_3 cu axa Ox aleasă.

Pentru aceasta se scriu relațiile

$$\varepsilon_{\varphi 1} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\varphi_1 + \frac{1}{2}\gamma_{xy}\sin 2\varphi_1$$

$$\varepsilon_{\varphi 2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\varphi_2 + \frac{1}{2}\gamma_{xy}\sin 2\varphi_2 \qquad (1.26)$$

$$\varepsilon_{\varphi 3} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\varphi_3 + \frac{1}{2}\gamma_{xy}\sin 2\varphi_3$$

cu ajutorul cărora se pot determina cele trei necunoscute ε_x, ε_y și γ_{xy}.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru determinarea tensiunilor principale, într-un punct oarecare, se procedează după cum urmează :

1°. Se alege axa Ox și se determină valorile lungirilor specifice după trei direcții, formînd unghiurile φ_1, φ_2 și φ_3 cu axa aleasă.

2°. Cele trei deformații măsurate se introduc în sistemul de ecuații (1.26) care se rezolvă în raport cu ε_x, ε_y și γ_{xy}.

3°. Se determină lungirile specifice principale ε_1 și ε_2, fie pe cale analitcă, utilizînd relațiile (1.21), fie pe cale grafică cu cercul lui Mohr (fig. 1.20).

4°. Se determină direcțiile principale, cu ajutorul relației (1.9) și tensiunile principale, cu ajutorul relației (1.10).

În tabelul 1.3 se dau relațiile între tensiuni și deformațiile specifice, în domeniul elastic, pentru diferite stări de tensiune.

Se menționează că determinarea pe cale grafică a tensiunilor și deformațiilor se face mai repede decît pe cale analitică însă cu precizie mai redusă.

Pentru exemplificare, privind utilizarea cercului lui Mohr la determinarea deformațiilor, se consideră, mai întîi, cazul general cînd cele trei direcții 1, 2 și 3, după care se măsoară deformațiile specifice ε_1, ε_2 și ε_3 (fig. 1.24,a) au direcții oarecare (direcția 1 cu 2 formează unghiul $-\alpha$ și 1 cu 3 formează unghiul $+\beta$)*).

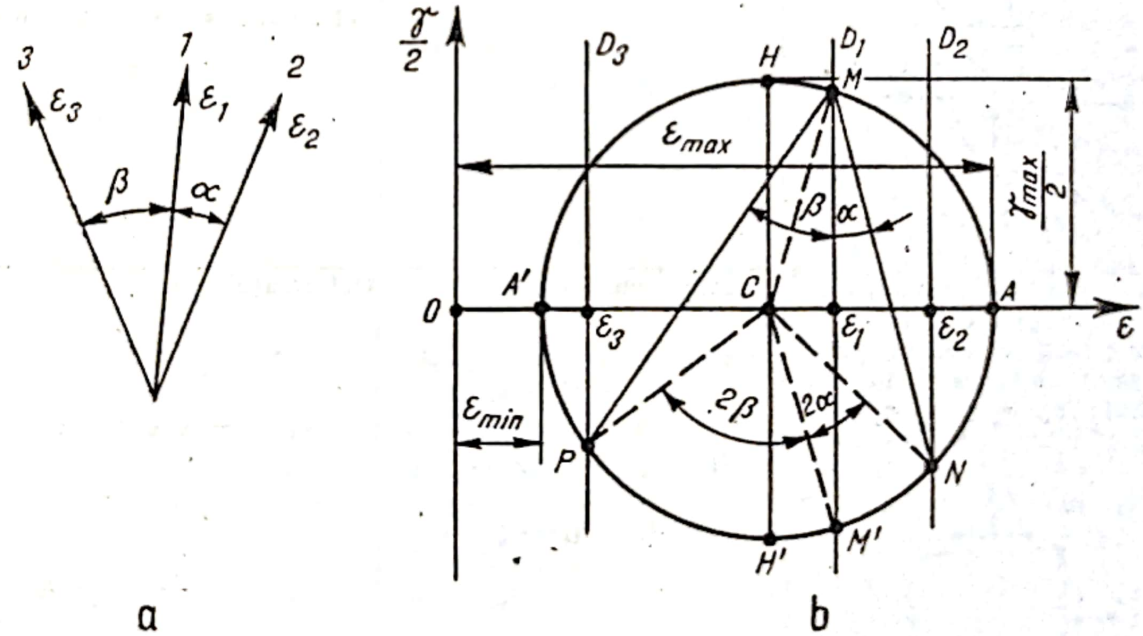


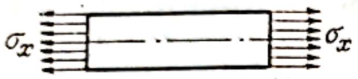
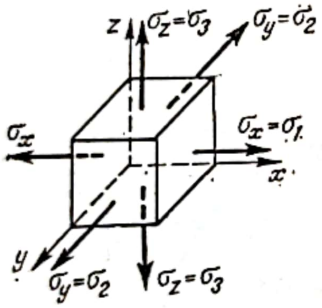
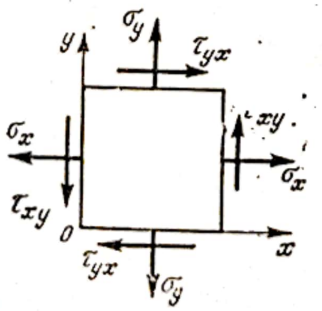
Fig. 1.24.

* Se menționează că direcțiile 1, 2 și 3 sînt direcții oarecare, deci deformațiile specifice corespunzătoare, ε_1, ε_2 și ε_3 nu sînt deformații specifice principale; acestea s-au notat în fig. 1.24 și 1.25 cu ε_{max} și ε_{min}.

Scanned with OKEN Scanner

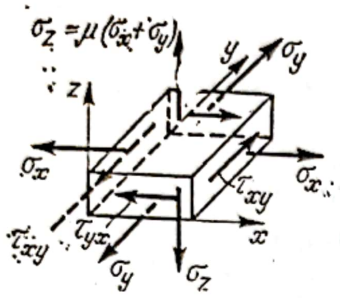
Tabelul 1.3

Relaţii între tensiuni şi deformaţii specifice în domeniul elastic pentru diferite stări de tensiuni [2]

Felul stării de tensiuni şi specificaţia tensiunilor şi a deformaţiilor specifice	Expresia tensiunilor în funcţie de deformaţiile specifice	Expresia deformaţiilor specifice în funcţie de tensiuni
1	2	3
1. Stare liniară de tensiuni  	Tensiuni normale principale $\sigma_1 = \sigma_x = E\varepsilon_x = 3K\varepsilon_v$ Tensiunea tangenţială pe plane ce nu coincid cu direcţia tensiunii principale $\tau_n = G \cdot \gamma_{an_1}$ unde γ_{nn_1} este variaţia unghiului iniţial drept, între direcţia n şi normala n_1 la această direcţie.	Deformaţia sepcifică principală longitudinală $\varepsilon_1 = \varepsilon = \frac{\sigma}{E_x}$ Deformaţia specifică transversală (în sens perpendicular, pe direcţia deformaţiei principale) $\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu\varepsilon_x = -\mu\frac{\sigma_x}{E}$ Deformaţia specifică de volum $\varepsilon_v = \frac{1}{3K}\sigma_x$
2. Întindere sau compresiune uniformă după trei direcţii : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$ $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon$  	Tensiunile sînt egale după toate direcţiile $\sigma_m = 3K\varepsilon_m$	Deformaţiile specifice principale sînt egale după toate direcţiile $\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{3K}$ Deformaţia specifică de volum $\varepsilon_v = \frac{\sigma}{K}$
3. Stare plană de tensiuni (în planul xOy). Tensiunile principale şi deformaţiile specifice principale în plan) : σ_1, σ_2 şi ε_1, ε_2  $(\sigma_z = \tau_{yz} = \sigma_{zx} = 0$ $\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0)$	Valoarea tensiunilor $\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)$ $\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)$ $\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}$	Deformaţiile specifice $\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y)$ $\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x)$ $\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$ $\varepsilon_z = -\frac{\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)$ Deformaţia specifică de volum : $\varepsilon_v = \frac{\sigma_m}{K}$ în care $\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{3}$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.3 (continuare)

1	2	3
4. Starea plană de tensiuni (în planul xOy). Tensiunile și deformațiile principale în planul xOy) σ_1, σ_2 și $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  $(\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0)$	Deformațiile specifice ε_y, γ_{xy} se consideră compuse din două deformații : deformația specifică de volum (deformația tensorului sferic) și deformația deviatorului deformației (lunecare pură) Valoarea componentelor tensiunilor $\sigma_x = 3K\varepsilon_m + 2G(\varepsilon_y - \varepsilon_m)$; $\sigma_y = 3K\varepsilon_m + 2G(\varepsilon_y - \varepsilon_m)$; $\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y)$; $\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}$ Primul termen din expresiile σ_x și σ_y corespunde deformației specifice de volum, cel de-al doilea, lunecării pure.	Componentele deformației specifice : $\varepsilon_x = \frac{1+\mu}{E}[(1-\mu)\sigma_x - \mu\sigma_y]$ $\varepsilon_y = \frac{1+\mu}{E}[(1-\mu)\delta_y - \mu\sigma_x]$ $\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$ Deformația specifică de volum $\varepsilon_v = \frac{\sigma_m}{K}$
5. Stare spațială de tensiuni (caz general) : $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ și $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ (v. fig. 1.4)	Deformațiile specifice : ε_x, ε_y, ε_z și γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{zx} se consideră compuse din două deformații, ca la punctul 4. Valoarea componentelor tensiunilor $\sigma_x = 3K\varepsilon_m + 2G(\varepsilon_x - \varepsilon_m)$ $\sigma_y = 3K\varepsilon_m + 2G(\varepsilon_y - \varepsilon_m)$ $\sigma_z = 3K\varepsilon_m + 2G(\varepsilon_z - \varepsilon_m)$ $\tau_{xy} = G\gamma_{xy}$ $\tau_{yz} = G\gamma_{yz}$ $\tau_{zx} = G \cdot \gamma_{zx}$ Primul termen din expresiile σ_x, σ_y, σ_z corespunde deformației specifice de volum, cel de-al doilea lunecării pure. Relația între ε_m și ε_v $\sigma_m = K\varepsilon_v$ Relația dintre mărimea tensiunii ideale σ_i și mărimea deformației specifice ideale $\sigma_i = 3G\varepsilon_i$ în care	Componentele deformației $\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]$; $\varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]$; $\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]$; $\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xx}}{G}$ $\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$ $\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$ $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\sigma_m}{K}$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}$$

Scanned with OKEN Scanner

Construcția cercului lui Mohr se face după cum urmează : Se trasează trei verticale D_1, D_2 și D_3 cu abscisele ε_1, ε_2 și ε_3. Dintr-un punct oarecare M situat pe verticale cu abscisa ε_1, se trasează o dreaptă înclinată cu unghiul $+\alpha$. Aceasta intersectează verticala D_2, cu abscisa ε_2, în punctul N. La fel se trasează prin punctul M dreapta înclinată cu unghiul $-\beta$, care intersectează verticala D_3 în punctul P. Cercul ce trece prin punctele MN și P este cercul lui Mohr. Prin punctul C care este centrul cercului trece axa $O\varepsilon$ (fig. 1.24, b).

Punctele A și A' corespund lungirilor specifice maxime respectiv minime, iar punctele H și H' corespund la $\pm \frac{\gamma_{max}}{2}$.

Pentru simplificarea calculelor una din direcțiile de măsurare coincide cu axa Ox (respectiv Oy) în care caz $\varphi_1 = 0$. Pentru exemplificare se consideră că lungirile specifice măsurate după trei direcții (fig. 1.25) au valorile : $\varepsilon_1 = 200 \cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_2 = 300 \cdot 10^{-6}$ și $\varepsilon_3 = -50 \cdot 10^{-6}$.

Direcțiile de măsurare sînt definite prin unghiurile : $\varphi_1 = 0$, (direcția lungirii specifice ε_1 coincide cu Ox), $\varphi_2 = -40°$ și $\varphi_3 = +60°$.

Lungirea specifică intermediară ca mărime fiind, ca și în cazul precedent, ε_1, aceasta se va așeza între deformațiile maximă și minimă între

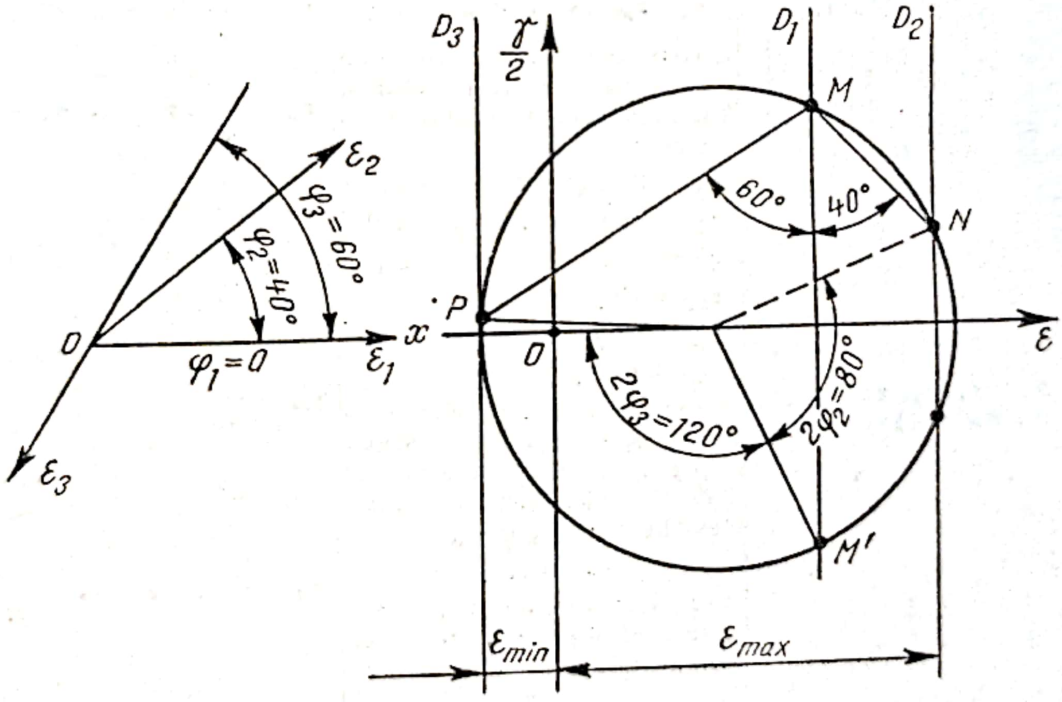


Fig. 1.25.

care unghiul este mai mic de 180°. Unghiul dintre ε_1 și ε_2 este $\varphi_2 = -40°$, iar dintre ε_1 și ε_3 este $\varphi_3 = 60°$.

Construirea cercului lui Mohr și determinarea deformațiilor specifice principale se face ca și în cazul precedent (fig. 1.24). În acest caz se observă că ε_{min} este negativ (compresiune).

Scanned with OKEN Scanner

1.4.4. STABILIREA DIRECȚIILOR PENTRU MĂSURAREA DEFORMAȚIILOR

În cazul stării plane de tensiuni, dacă se cunosc direcțiile deformațiilor specifice principale, sînt suficiente așa cum s-a menționat mai sus, două măsurători ale deformațiilor pentru determinarea valorilor deformațiilor specifice principale.

În cazul general de solicitare plană, cînd nu se cunosc direcțiile deformațiilor principale, pentru determinarea mărimii și direcției deformațiilor principale, este necesar să se măsoare deformațiile după trei direcții așa cum rezultă din relațiile (1.26).

Dacă se determină deformația specifică după o a patra direcție, valoarea sa se poate utiliza fie direct la calculul deformațiilor principale, fie pentru verificarea exactității rezultatelor determinate cu ajutorul celorlalte trei deformații.

Urmare celor arătate mai sus, deformațiile principale se determină în funcție de trei valori ale deformațiilor măsurate după trei direcții oarecare, (relațiile 1.26), fără să se facă vreo precizare în legătură cu unghiurile dintre cele trei direcții.

Măsurarea lungirilor specifice pentru direcții care formează unghiuri mici între ele este legată de erori mari la calculul valorilor și direcțiilor deformațiilor principale; pe de altă parte, din expresia lui ε_φ (relația (1.20 a)) rezultă că alegerea anumitor unghiuri simplifică în mod simțitor calculul. Rezolvarea cea mai simplă se obține folosind unghiurile indicate în tabelul 1.4.

Tabelul 1.4

Valorile unghiurilor care dau rezolvarea cea mai simplă a expresiei lui ε_φ

φ, în grade	sin 2φ	cos 2φ
0	0	1
15	1/2	$\sqrt{3}/2$
30	$\sqrt{3}/2$	1/2
45	1	0
60	$\sqrt{3}/2$	−1/2
90	0	−1
120	$-\sqrt{3}/2$	−1/3

Unghiurile dintre deformațiile măsurate trebuie să fie alese egale sau mai mari de 45°.

Utilizarea cea mai largă o au unghiurile $\varphi_1=0°$, $\varphi_2=45°$ și $\varphi_3=90°$, care formează o rozetă dreptunghiulară, apoi unghiurile $\varphi_1=0°$, $\varphi_2=60°$ și $\varphi_3=120°$, formînd o rozetă în formă de triunghi echilateral, numită rozeta delta. O variantă a rozetei delta, cunoscută ca rozeta T-delta, are a patra direcție de măsurare a deformației perpendiculară pe una din primele trei.

Cînd direcțiile deformațiilor principale sînt aproximativ cunoscute, se preferă rozeta dreptunghiulară deoarece două direcții de măsurare se pot orienta în aceste direcții (fig. 1.26).

Dacă nu se cunosc direcțiile deformațiilor principale, se recomandă a se utiliza rozeta delta sau T-delta, deoarece au unghiurile maxime posibile între direcții.

Scanned with OKEN Scanner

De subliniat că relaţiile obţinute între cele trei deformaţii măsurate după trei direcţii oarecare şi deformaţiile principale şi direcţiile principale sînt valabile pentru un singur punct. De aceea, la utilizarea rozetelor se va obţine un rezultat exact numai în cazul cînd deformaţiile specifice pe suprafaţa ocupată de rozetă nu se schimbă.

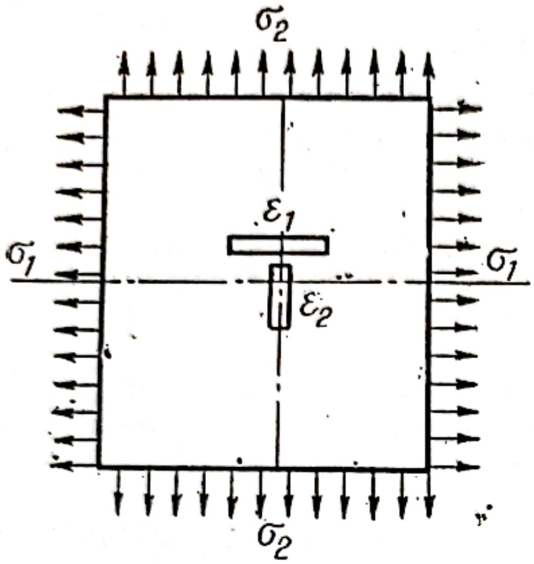


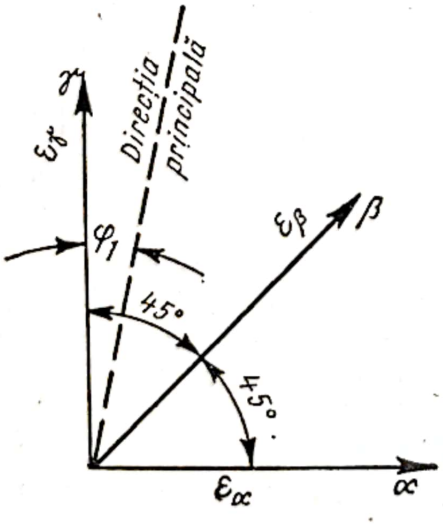
Fig. 1.26.

Pe suprafeţele cu un gradient mare al deformaţiei specifice rezultatele obţinute cu ajutorul rozetei vor fi cu atît mai puţin precise cu cît este mai mare suprafaţa ocupată de rozetă, deci cu cît *baza de măsurare* a tensometrului este mai mare.

Pentru determinarea deformaţiilor specifice principale şi a direcţiilor acestora pe o porţiune cu gradient mare al deformaţiilor, deci şi al tensiunilor, baza rozetei trebuie să fie cît mai mică. De aceea, în asemenea cazuri, este indicat a se utiliza traductoare cu baza mică. Această condiţie poate fi îndeplinită cel mai bine utilizînd tensometria electrică rezistivă — cu mărci avînd baza foarte mică, la lungimi de 1,5 mm, sau metode optice (vezi cap. 3 şi 4).

1.4.5. EXPRESIILE DEFORMAŢIILOR SPECIFICE PRINCIPALE ŞI TENSIUNILOR PRINCIPALE ÎN CAZUL DIFERITELOR TIPURI DE ROZETE

În tabelul 1.5 se dau — pentru tipurile uzuale de rozete — valorile: tensiunilor principale normale σ_1 şi σ_2, tensiunilor principale tangenţiale



a

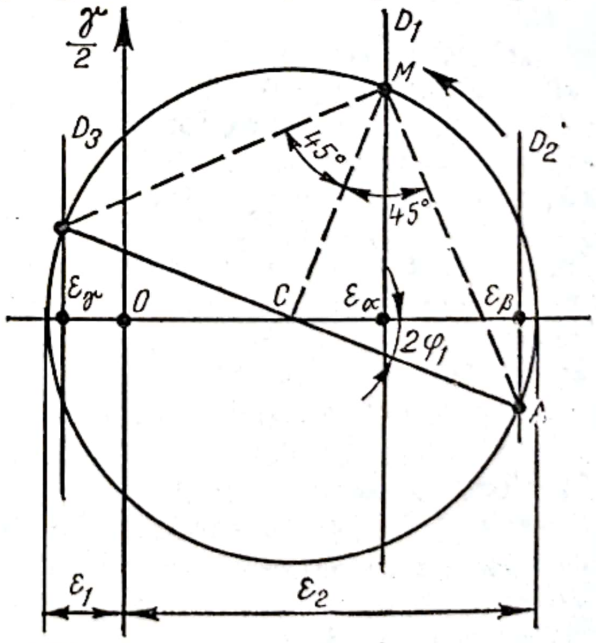
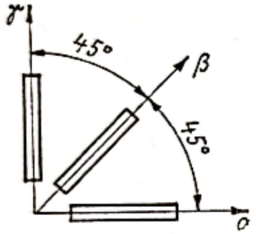
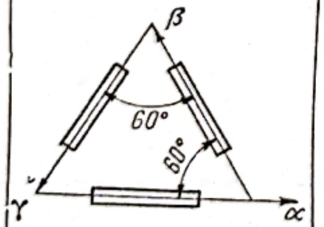


Fig. 1.27. b

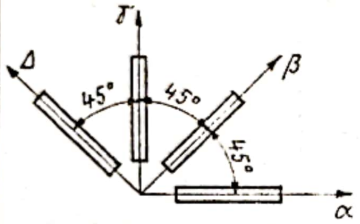
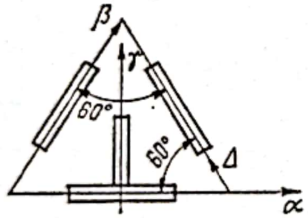
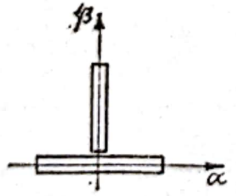
Tabelul 1.5

Tensiunile principale, deformațiile principale și direcțiile principale

Poz.	Tipul rozetei	Amplasarea traductoarelor	Tensiunile principale normale, $\sigma_{1,2}$ Tensiunile principale tangențiale, $\tau_{1,2}$ Deformațiile specifice principale, $\varepsilon_{1,2}$	Direcțiile principale (unghiul dintre σ_1 și ε_α)	Observații
1.	Dreptunghiulară 3 traductoare		$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\gamma}{2} \pm \frac{1}{1+\mu}\sqrt{(\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\gamma)^2+(2\varepsilon_\beta-\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\gamma)^2}\right]$ $\tau_{1,2} = \pm\frac{E}{1+\mu}\sqrt{(\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\gamma)^2+(2\varepsilon_\beta-\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\gamma)^2}$ $\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_\alpha+\varepsilon_\gamma}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_\alpha+\varepsilon_\gamma)^2+(2\varepsilon_\beta-\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\gamma)^2}$	$\operatorname{tg}2\varphi_1 = \frac{2\varepsilon_\beta-\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\gamma}$	$\varepsilon_\beta = \frac{\varepsilon_\alpha+\varepsilon_\gamma}{2}$
2.	Delta, 3 traductoare		$\sigma_{1,2} = E\left(\frac{\varepsilon_\alpha+\varepsilon_\beta+\varepsilon_\gamma}{3(1-\mu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{3(1+\mu)}\times\right.$ $\left.\times\sqrt{(\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\beta)^2+(\varepsilon_\beta-\varepsilon_\gamma)+(^2\gamma-\varepsilon_\alpha)^2}\right)$ $\tau_{1,2} = \pm\frac{\sqrt{2E}}{3(1+\mu)}\sqrt{(\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\beta)^2+(\varepsilon_\beta-\varepsilon_\gamma)^2+(\varepsilon_\gamma-\varepsilon_\alpha)^2}$ $\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_\alpha+\varepsilon_\beta+\varepsilon_\gamma}{3} \pm \frac{\sqrt{3}}{3}\sqrt{(\varepsilon_\alpha-\varepsilon_\beta)^2+(\varepsilon_\beta-\varepsilon_\gamma)^2+(\varepsilon_\gamma-\varepsilon_\alpha)^2}$	$\operatorname{tg}2\varphi_1 = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_\gamma-\varepsilon_\beta)}{2\varepsilon_\alpha-(\varepsilon_\beta+\varepsilon_\gamma)}$	$\varepsilon_\gamma > \varepsilon_\beta$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.5 (continuare)

Poz.	Tipul rozetei	Amplasarea traductoarelor	Tensiunile principale normale, $\sigma_{1,2}$ Tensiunile principale tangentiale, $\tau_{1,2}$ Deformațiile specifice principale, $\varepsilon_{1,2}$	Direcțiile principale (unghiul dintre σ_1 și ε_α)	Observații
3.	Dreptunghiulară 4 traductoare		$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma + \varepsilon_\Delta}{2(1-\mu)} \pm \frac{1}{1+\mu}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma)^2 + (\varepsilon_\beta - \varepsilon_\Delta)^2}\right]$ $\tau_{1,2} = \pm \frac{E}{2(1+\mu)}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma)^2 + (\varepsilon_\beta - \varepsilon_\Delta^2)}$ $\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma + \varepsilon_\Delta}{4} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma)^2 + (\varepsilon_\beta - \varepsilon_\Delta)^2}$	$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\Delta}{\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma}$	$\varepsilon_\beta > \varepsilon_\Delta$
4.	T — delta 4 traductoare		$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\Delta}{1-\mu} \pm \frac{1}{1+\mu}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\Delta)^2 + \frac{4}{3}(\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\beta)^2}\right]$ $\tau_{1,2} = \pm \frac{E}{2(1+\mu)}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\Delta)^2 + \frac{4}{3}(\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\beta)^2}$ $\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_\alpha \pm \varepsilon_\Delta}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\Delta)^2 + \frac{4}{3}(\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\Delta)^2}$	$\operatorname{tg} 2\varphi_1 = \frac{2(\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\beta)}{\sqrt{3}(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\Delta}$	$\varepsilon_\gamma > \varepsilon_\beta$
5.	Două traductoare perpendiculare.		$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}[\varepsilon_\alpha + \mu\varepsilon_\beta]$, $\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu}[\varepsilon_\beta + \mu\varepsilon_\alpha]$ $\tau_{1,2} = \pm \frac{E}{2(1+\mu)}[\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\beta]$ $\varepsilon = \varepsilon_\alpha$; $\varepsilon_{12} = \varepsilon_\beta$	0	$\varepsilon_\alpha > \varepsilon_\beta$

Scanned with OKEN Scanner

τ_1 şi τ_2, deformaţiilor specifice principale ε_1 şi ε_2 precum şi valoarea unghiului φ_1 dintre σ_1 şi ε_α exprimate în funcţie de valorile deformaţiilor specifice ε_α ε_β, ε_γ şi ε_Δ, după caz, măsurate după direcţiile α, β γ şi Δ pe care au fost plasate traductoarele.

Formulele menţionate au la bază relaţiile (1.19) ... (1.26).

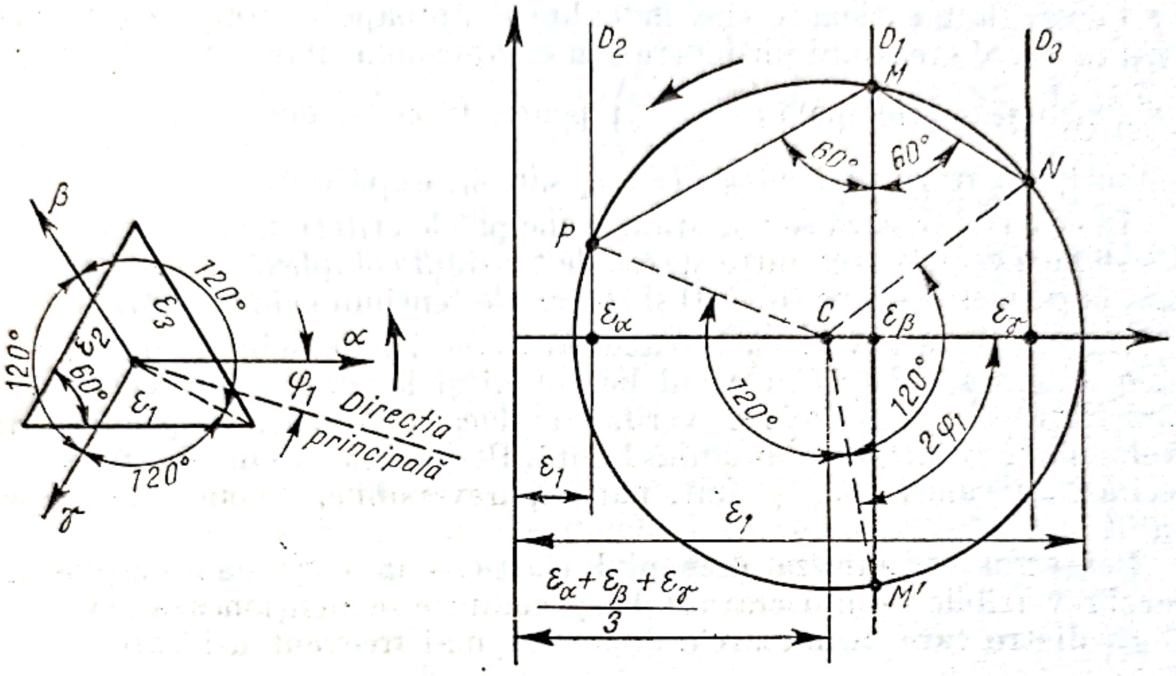


Fig. 1.28.

In fig. 1.27 şi 1.28 se arată cum se determină pe cale grafică, utilizînd cercul lui Mohr, lungirile specifice principale şi direcţiile principale în cazul rozetelor de la poz. 1 şi 2, tabelul 1.5.

1.5. CRITERII DE REZISTENŢĂ

1.5.1. STAREA DE TENSIUNE ECHIVALENTĂ

Starea de tensiune dintr-un punct P a unui solid încărcat cu sarcini, după cum s-a văzut la paragraful 1.2.4, este definită, în cazul general, prin direcţiile şi valorile celor trei tensiuni principale σ_1, σ_2 şi σ_3. Este necesar să se verifice că această stare de tensiune corespunde unor deformaţii mici şi reversibile adică nu este depăşită limita de elasticitate a materialului, limită pînă la care sînt valabile, practic, relaţiile stabilite mai sus pentru calculul tensiunilor şi deformaţiilor.

Această verificare se face, în cazul solicitării complexe (starea spaţială de tensiune a materialului), utilizînd noţiunea de stare de tensiuni echivalentă.

Starea de tensiuni echivalentă este necesar să îndeplinească o serie de condiţii dintre care se menţionează :

Scanned with OKEN Scanner

— să poată fi realizată uşor cu dispozitive şi maşini de construcţie simplă;

— epruvetele utilizate să fie uşor de realizat, şi

— porţiunile epruvetelor pe care se fac măsurătorile nu trebuie să fie influenţate de starea de tensiuni din punctele de aplicaţie a sarcinilor.

Condiţiile menţionate sînt îndeplinite aproape în totalitate în cazul stării liniare de tensiuni (întindere sau compresiune monoaxială). În acest caz tensiunea principală $\left(\sigma = \frac{N}{A}\right)$ poate fi considerată drept criteriu de apariţie a stării periculoase (σ_e, σ_c sau σ_r, după caz).

În cele ce urmează se vor arăta principalele criterii de rezistenţă după care se face compararea între starea de tensiuni complexă (plană sau spaţială, la care este supus solidul) şi starea de tensiuni echivalentă.

Experienţa a arătat că în cazul metalelor, îndeosebi a oţelurilor şi într-o anumită măsură în cazul betonului şi lemnului, ipotezele teoriei elasticităţii sînt satisfăcător verificate dacă deformaţiile specifice sînt reversibile şi rămîn sub o anumită limită. Peste această limită deformaţiile specifice au valori mari şi sînt, parţial, ireversibile, fenomen ce trebuie evitat.

Pentru a caracteriza domeniul elastic — în care deformaţiile sînt mici şi reversibile — în literatura de specialitate se menţionează mai multe criterii dintre care următoarele două sînt mai frecvent utilizate.

1.5.2. CRITERIUL MOHR-TRESCA

După acest criteriu se admite că limita de elasticitate nu este depăşită atît timp cît cercul mare a lui Mohr (fig. 1.14) rămîne în interiorul aşa zisei *curbe intrinseci* S (fig. 1.29), a cărei formă depinde de materialul din care este confecţionat solidul considerat.

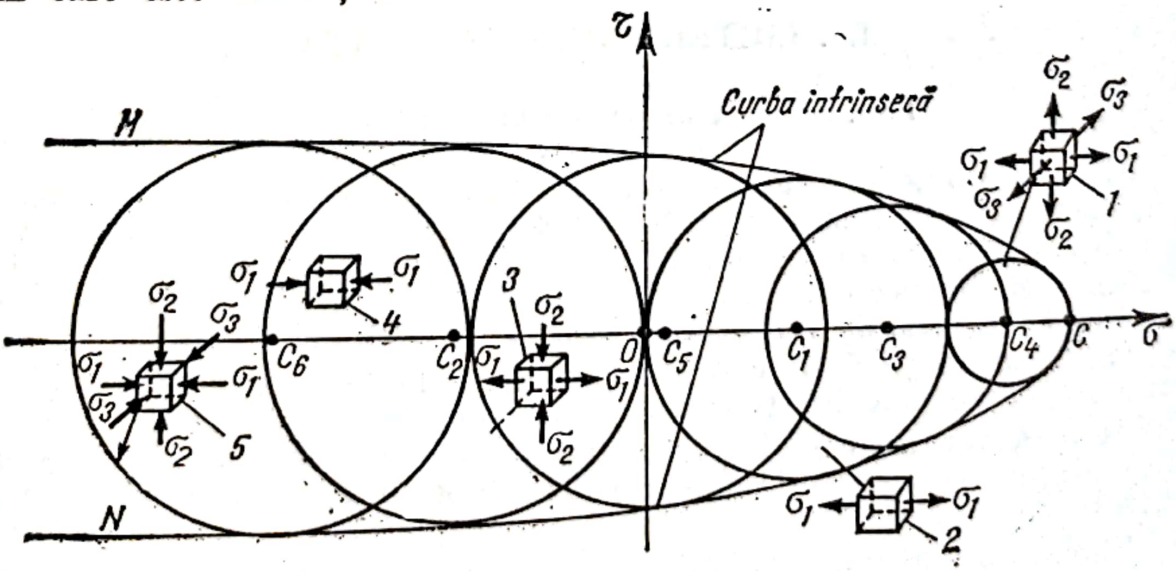


Fig. 1.29.

Cunoscînd *curba intrinsecă* a materialului şi tensiunile principale σ_1, σ_2, σ_3 se poate verifica dacă starea limită este sau nu depăşită.

Se consideră o stare spaţială de tensiune şi se presupune că: $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_2$. Se reprezintă grafic starea de eforturi în cazul unui material care are rezistenţă de rupere la întindere mai mică decît cea la compresiune (de exemplu, fonta). Cercul cu centrul C_1 reprezintă starea limită corespunzătoare solicitării de întindere simplă iar cercul cu centrul C_2 corespunde stării limită pentru solicitarea de compresiune simplă. Cercul cu centrul în O corespunde solicitării de forfecare pură iar cercurile cu centrele C_3, C_4 şi C_5 reprezintă starea limită pentru diferite valori ale lui σ_1 şi σ_2 aşa cum se arată schematic cu ajutorul prismelor elementare *1*, *5* şi *6*.

După Mohr limita zonei de rezistenţă este dată de curba înfăşurătoare MCN, a acestei familii de cercuri. Dacă se cunoaşte această curbă numită aşa cum s-a menţionat *curbă intrinsecă*, pentru studiul rezistenţei, după teoria lui Mohr şi Tresca, se procedează astfel. Se construieşte cercul lui Mohr pentru starea de tensiune dată, admiţînd că $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_2$. Dacă acest cerc este în interiorul curbei intrinseci, starea de tensiune studiată se găseşte în zona de rezistenţă a materialului considerat.

Curba intrinsecă este foarte deschisă în cazul materialelor fragile, cum este fonta (fig. 1.30), a cărei rezistenţă la întindere (cercul *1*) este

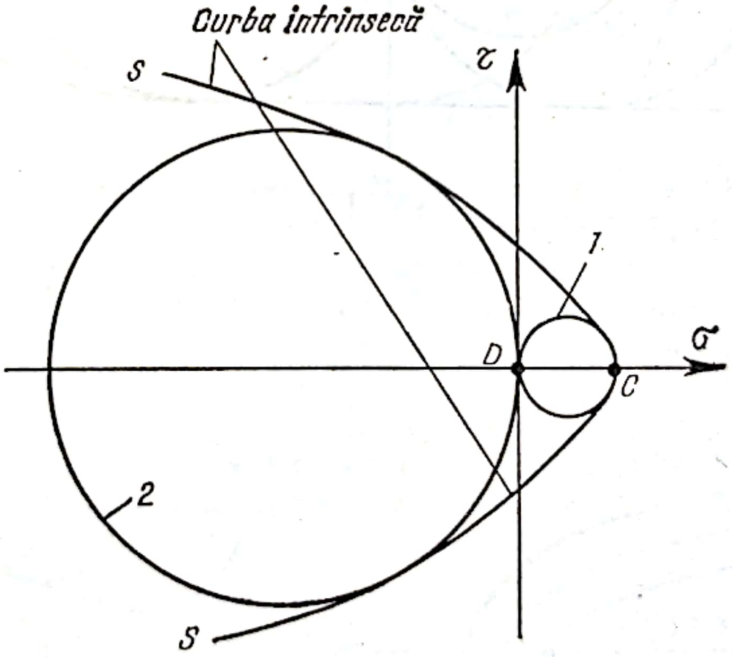


Fig. 1.30.

inferioară rezistenţei la compresiune (cercul *2*) şi este închisă în cazul materialelor ductile cum este oţelul carbon (fig. 1.31). Dacă materialul rezistă la fel la întindere ca şi la compresiune cercurile C_1 şi C au diametrele egale şi curba intrinsecă este reprezentată prin două drepte tangente a aceste cercuri pe porţiunea dintre ele (fig. 1.31).

Scanned with OKEN Scanner

Pentru ca materialul să nu sufere deformaţii nereversibile, este necesar ca cercurile mari ale lui Mohr (vezi fig. 1.14), respectiv înfăşurătoarea acestora să fie sub curba intrinsecă corespunzătoare stării elastice limită.

Dacă pentru curba intrinsecă ce reprezintă starea limită, coeficientul de siguranţă $C = 1$, pentru curbele înfăşurătoare corespunzătoare stărilor de tensiune sub starea limită $C > 1$ (fig. 1.32).

Stabilirea coeficientului de siguranţă pe baza acestei teorii este foarte laborioasă deoarece pentru fiecare material trebuie construite curbele intrinseci pe baza a numeroase încercări executate la maşini complicate.

S-a încercat să se aducă simplificări în cazul materialelor ce se comportă diferit la întindere faţă de compresiune în sensul că curba intrin-

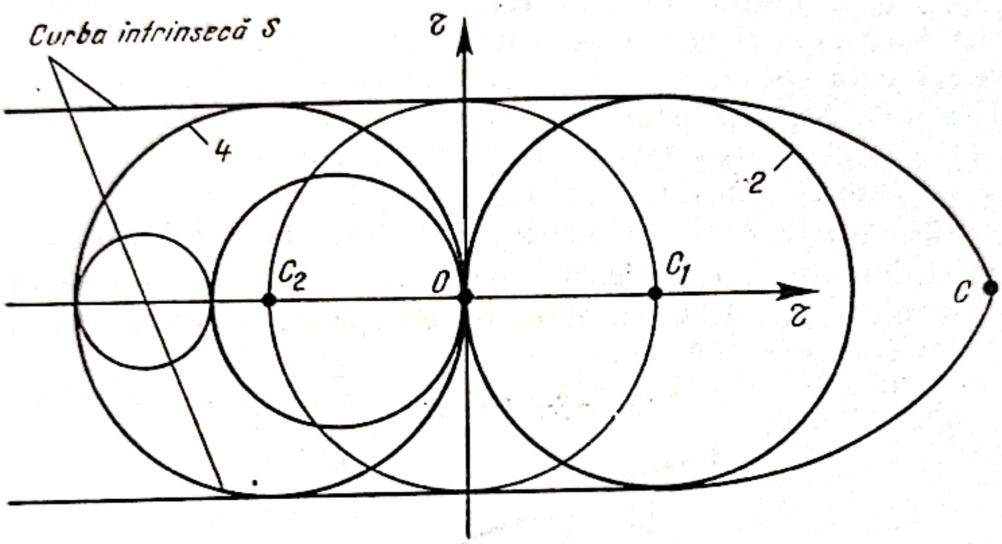


Fig. 1.31.

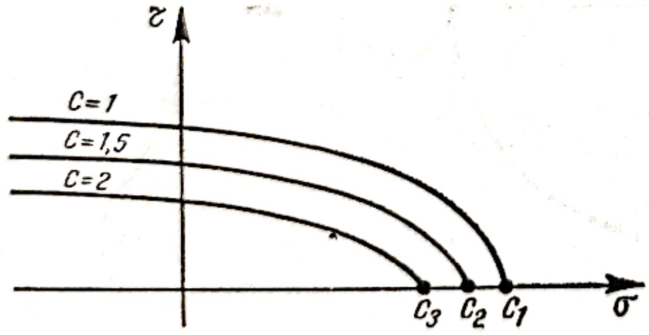


Fig. 1.32.

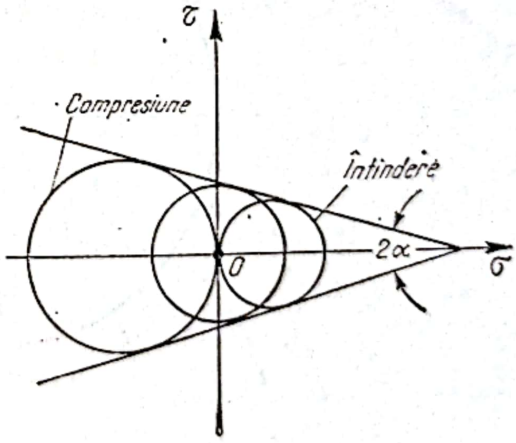


Fig. 1.33.

secă — pe porţiuni mici — se consideră reprezentată prin două drepte înclinate (fig. 1.33).

În acest caz curba intrinsecă se construieşte numai pe baza a două experienţe, una de întindere şi alta de compresiune.

Scanned with OKEN Scanner

După Mohr și Tresca, criteriul de rezistență se exprimă prin relația

$$\sigma_1 - \sigma_2 \leqslant \sigma_e. \tag{1.28}$$

unde σ_e este limita de elasticitate a materialului la tracțiune. Între tensiunile principale s-a considerat că există relația $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_2$.

Relația (1.28) exprimă, de fapt, criteriul de rezistență ce are la bază ipoteza a III-a de rupere (ipoteza efortului unitar tangențial maxim).

1.5.3. CRITERIUL LUI MISES

Mises admite că limita de elasticitate, în cazul stării spațiale de tensiune, este atinsă dacă

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_e^2.$$

Criteriul de rezistență se exprimă deci

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \leqslant 2\sigma_e^2. \tag{1.29}$$

Diferența între rezultatele obținute, aplicînd cele două criterii, este relativ mică ($< 15\%$).

În cazul stării plane de tensiune ($\sigma_3 = 0$) relația (1.29) devine

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 \leqslant \sigma_e^2. \tag{1.30}$$

Se observă că la baza acestui criteriu de rezistență stă ipoteza a IV-a de rupere (ipoteza energiei totale de deformație).

În cazul pieselor supuse la solicitări variabile (ciclice) se aplică aceleași criterii de rezistență cu deosebire că în loc de σ_e (limita de elasticitate la solicitări axiale statice) se introduce rezistența la oboseală σ_r corespunzătoare coeficientului de asimetrie r a ciclului respectiv.

În cazul solicitărilor variabile aplicarea criteriului Mohr-Tresca, exprimat prin relația (1.28) este dificilă dacă în cursul unei perioade semnele algebrice ale tensiunilor principale σ_1 și σ_2 se schimbă.

1.6. INFLUENȚA LUNGIMII ȘI A PROFILULUI BAZEI DE MĂSURARE

1.6.1. INFLUENȚA LUNGIMII BAZEI DE MĂSURARE

Așa cum s-a arătat în paragraful precedent măsurarea deformațiilor se face pe o anumită lungime l_0 numită *bază de măsurare* care are o lungime finită. Cu ajutorul diferitelor tehnici tensometrice se determină deformația Δl_0, respectiv lungirea specifică. Dacă deformația specifică pe

Scanned with OKEN Scanner

distanţa l_0 nu este uniformă, lungirea specifică determinată reprezintă o valoare medie corespunzătoare bazei de măsurare l_0.

Se consideră, pentru început, cazul cînd baza de măsurare este rectilinie. Dacă lungirea specifică este constantă pe toată lungimea l_0, este evident că valoarea lungimii de măsurare l_0 nu influenţează valoarea lui ε.

Dacă ε variază liniar, lungimea bazei de măsurare poate, de asemenea, să aibă o valoare oarecare, deoarece lungirea specifică medie

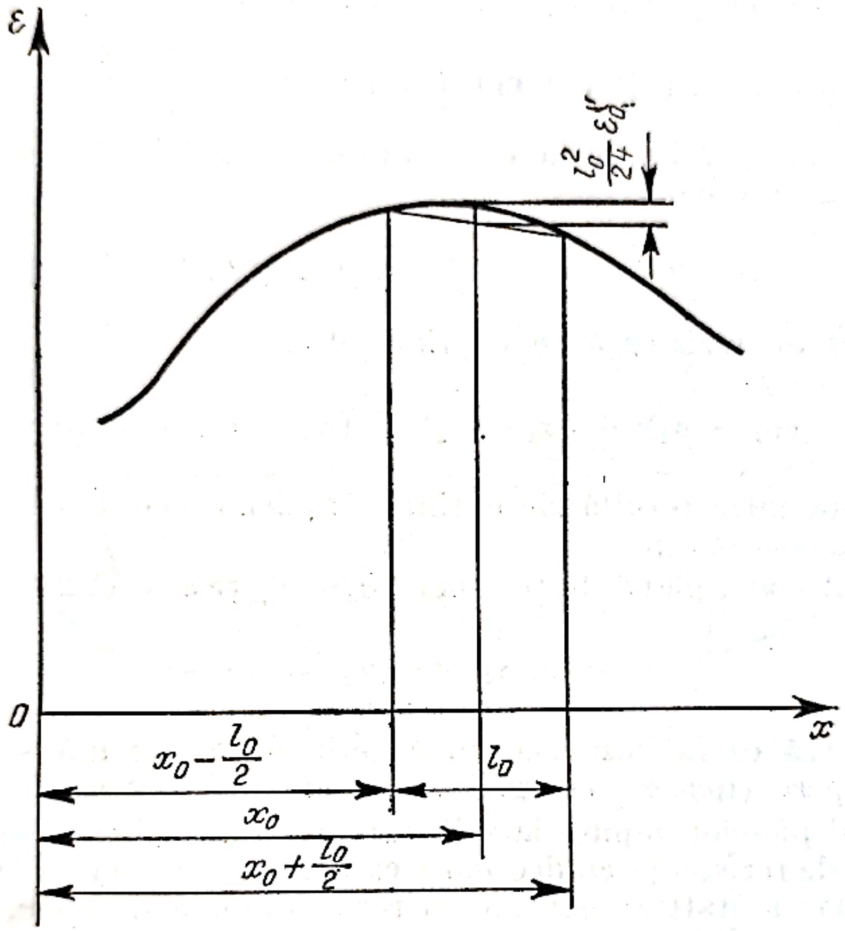


Fig. 1.34.

măsurată are valoare bine determinată — fiind egală cu valoarea ε_0 corespunzătoare mijlocului distanţei l_0.

Dacă derivata secundă ε_0'' nu este nulă se comite o eroare asimilîndu-se lungirea specifică mediei cu valoarea reală a lungirii specifice medii ε_m corespunzătoare bazei de măsurare l_0.

Dantu [4] a stabilit următoarea relaţie între ε_0 şi lungirea specifică reală corespunzătoare mijlocului bazei de măsurare l_0

$$\varepsilon_m = \varepsilon_0 + \frac{l_0^2}{24}\varepsilon_0'' \tag{1.31}$$

unde ε_0 şi ε_0'' sînt valorile lungirii specifice, respectiv derivata secundă a acesteia, corespunzătoare distanţei x_0 ce reprezintă mijlocul bazei de măsurare l_0 (fig. 1.34). Rezultă deci că lungimea bazei de măsurare este

Scanned with OKEN Scanner

indicat să fie cu atît mai mică cu cît derivata secundă a lui ε_0 este mai mare. Pentru trasarea curbei $\varepsilon_m = f(x)$ cu suficientă precizie este necesar să se facă determinări pentru un număr suficient de puncte.

1.6.2. INFLUENȚA DIFERENȚEI LUNGIMII DINTRE ARC ȘI COARDĂ

În cazul pieselor cu suprafețe curbe, lungimea de măsurare l_0 este formată dintr-un arc AB cu raza R, asimilînd piesa, pe această porțiune, cu un cilindru (fig. 1.35). Dacă α este unghiul la centru, corespunzător arcului AB, lungimea acestui arc este $R\alpha$, iar cea a coradei AB, $2R \sin \frac{\alpha}{2}$.

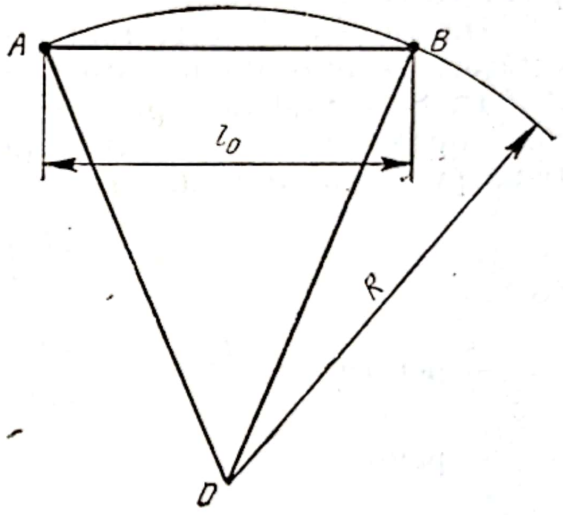


Fig. 1.35.

Deformarea arcului va fi

$$\Delta\alpha = \alpha\, dR + R d\alpha$$

și cea a coardei

$$\Delta c = 2dR \sin \frac{\alpha}{2} + R \cos \frac{\alpha}{2} d\alpha.$$

Eroarea relativă — dacă se neglijează infiniții mici de ordin superior — este

$$\frac{\Delta a - \Delta c}{\Delta a} = \frac{\alpha dR \frac{\alpha^2}{12} - R d\alpha \frac{\alpha^2}{8}}{\alpha dR + R d\alpha}. \quad (1.32)$$

În cazul cînd dR și $d\alpha$ sînt de semne contrare, eroarea relativă poate avea valori importante și devine infinită dacă $\frac{dR}{R} = -\frac{d\alpha}{\alpha}$.

De regulă dR și $d\alpha$ au același semn. Eroarea relativă pentru cazul cînd $dR = 0$ este egală cu $\frac{\alpha^2}{8}$.

Dacă, de exemplu, $\alpha = 20°$ eroarea relativă este 1,6%, ceea ce corespunde pentru R o valoare minimală de trei ori valoarea bazei de măsură l_0; de exemplu pentru $R = 12$ mm; $l_0 = 4$ mm.

1.7. EFECTUL PERTURBATOR AL EXTENSOMETRELOR, RESPECTIV AL TENSOMETRELOR, ASUPRA CÎMPULUI DE TENSIUNI ȘI DE DEFORMAȚII

La toate tipurile de extensometre, precum și în cazul unor tensometre, este necesară o forță de fixare a acestora pe piesa sau structura ce face obiectul cercetării, care este susceptibilă de a perturba cîmpul de tensiuni în vecinătatea punctului sau punctelor sale de aplicare. În plus,

Scanned with OKEN Scanner

în timpul încercării apare o forță de rapel care, de asemenea, are un efect perturbator asupra cîmpului de tensiuni din zona în care se face măsurarea.

Efectul perturbator este cu atît mai mare cu cît modulul de elasticitate al materialului piesei examinate este mai mic. Acest efect este evident în cazul extensometrelor mecanice, la care fixarea pe piesă a aparatului se face prin intermediul a două cuțite care, sub acțiunea forțelor de rapel, provoacă o solicitare de forfecare în straturile superificiale ale piesei, precum și în cazul traductoarelor rezistive aplicate pe plăci subțiri.

Efectul perturbator este și mai accentuat în cazul materialelor turnate, cum este betonul, unde, de regulă, extensometrul este înglobat în piesă ce se cercetează.

Dintre efectele perturbatoare de suprafață, studiate de diverși cercetători, se prezintă următoarele două cazuri:

1°. Se consideră o placă cu grosimea e, pe care se aplică tangențial două forțe opuse $\pm F$ la distanța l_0. Valoarea tensiunii la suprafață, într-un punct situat la distanța x (fig. 1.36), este dată de relația:

$$\sigma = \frac{2F}{\pi d}\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{l_0 - x}\right); \tag{1.33}$$

— pentru $x = \frac{l_0}{2}$, $\sigma = \frac{8F}{\pi d l_0}$;

— pentru $x = 2l_0$, $\sigma = -\frac{F}{\pi d l_0}$;

— pentru $x = 3l_0$, $\sigma = -\frac{F}{3\pi d l_0}$.

Se observă că, în conformitate cu principiul lui Saint Venant, efectul perturbator, practic, se limitează la o distanță de aproximativ $2l_0$ față de axa Oy.

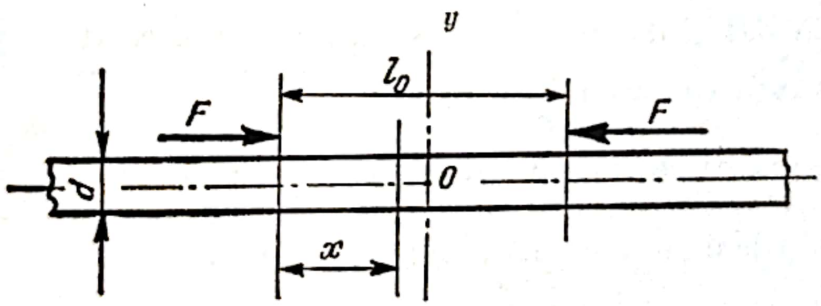


Fig. 1.36.

Deformația produsă de forța F pe lungimea l_0 este

$$\Delta l_0 = \frac{4F}{\pi d E} C \tag{1.34}$$

unde C este un coeficient ce variază între 4 și 6.

Se consideră K constanta elastică a tensometrului (extensometrului) utilizat. Reacțiunea produsă de aceasta introduce o eroare relativă

Scanned with OKEN Scanner

Δl, care raportată la deformaţia Δ_0 ce se produce în absenţa aparatului dă

$$\frac{\Delta l}{\Delta_0} = \frac{4K}{\pi dE} C. \tag{1.35}$$

Astfel, de exemplu, pentru $K = 10 \frac{\text{daN}}{\text{mm}}$, $d = 2\,\text{mm}$, $E = 1{,}4 \cdot 10^3 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$ (cazul betonului) şi $C = 5$, rezultă

$$\frac{\Delta l}{\Delta_0} = 4{,}9 \cdot 10^{-4} \text{ (neglijabilă).}$$

În cazul unei bare cu suprafaţa plană, solicitată în aceleaşi condiţii eroarea este

$$\frac{\Delta l}{\Delta_0} = \frac{3+\mu}{2} \frac{K}{\pi dE} C \tag{1.36}$$

Se observă că, în acest caz, eroarea este de aproape două ori mai mică.

2°. Dacă reacţiunea F este uniform repartizată, alternativ, pe fiecare jumătate de traductor (cazul traductoarelor rezistive) eroarea relativă este mult mai mică decît în cazul precedent (deci poate fi neglijată). Ea este dată de relaţia

$$\frac{\Delta l}{\Delta_0} = \frac{K}{dE}. \tag{1.37}$$

În cazul cînd se utilizează extensometre cu coardă vibrantă (v. § § 2.6.1) eroarea este de ordinul a 5—10 %, deci nu poate fi neglijată.

Unii cercetători au studiat influenţa forţei de rapel asupra rezultatelor măsurătorilor în cazul extensometrelor înglobate în structura studiată, ţinîndu-se seamă că modulul de elasticitate şi coeficientul lui Poisson ale extensometrului sînt diferite de cele ale materialului care este considerat omogen şi izotrop. Astfel Coutinho [8] a studiat această problemă considerînd cazul teoretic, că extensometrul are o formă sferică iar Hast [8] în cazul cînd forma acestuia este cilindrică.

1.8. CARACTERISTICILE DE BAZĂ ALE TENSOMETRELOR

Extensometrele şi majoritatea tensometrelor au următoarele caracteristici de bază:

— baza de măsurare l_0;

— sensibilitatea;

Scanned with OKEN Scanner

— domeniul de utilizare;
— precizia sau reproductibilitatea.

Cu majoritatea metodelor tensometrice uzuale, deformaţiile, deci şi tensiunile, nu pot fi măsurate într-un punct, ca urmare cîmpurile de tensiuni neliniare nu pot fi determinate fără introducerea unei anumite erori, care depinde aşa cum s-a văzut la § 1.6.1, în primul rînd, de mărimea *bazei de măsurare* l_0, considerată principala caracteristică a tensometrului.

A doua caracteristică de bază a tensometrelor este *sensibilitatea* care exprimă cea mai mică deformaţie ce poate fi citită pe scala aparatului. În cazul structurilor din oţel, în general, este suficientă o sensibilitate de 10^3 iar în cazurile unde aceasta nu are o importanţă deosebită o sensibilitate de 10^{-2} se poate considera satisfăcătoare. Trebuie avut în vedere că, adesea, alegerea unui grad mai mare de sensibilitate decît este necesar implică, în mod inutil, o creştere a complexităţii tehnicii de măsurare.

Domeniul de *măsurare* reprezintă deformaţia maximă ce poate fi măsurată cu un anumit tensometru (extensometru) şi care este limitat de indicaţia maximă a scalei acestuia. Domeniul şi sensibilitatea sînt intercondiţionate; tensometrele foarte sensibile răspund unor deformaţii mici cu apreciabile deviaţii ale acului indicator. Adesea este necesar un compromis între domeniu şi sensibilitate cu scopul de a obţine performanţele dorite pentru ambele caracteristici.

Precizia sau reproductibilitatea tensometrului nu depinde de sensibilitatea acestuia. Chiar şi cele mai sensibile tensometre pot da erori dacă ele nu sînt exploatate cu cea mai mare atenţie. O serie de factori externi — — cum este schimbarea de temperatură în timpul măsurărilor — pot da erori apreciabile. Precizia depinde, în bună parte, şi de modul cum se fac înregistrările rezultatelor măsurărilor: prin citire directă sau alt sistem analogic sau în sistem digital.

Marea majoritate a măsurărilor tensometrice se face la suprafaţa piesei sau structurii. Acestea pot fi efectuate cu tensometre (sau extensometre) *fixe* sau *amovibile*.

Tensometrele fixe (cazul traductoarelor rezistive) nu se pot demonta de pe structură în timpul întregii perioade de măsurare şi, de regulă, nu pot fi reutilizate.

Tensometrele amovibile — în categoria cărora intră aproape toate tensometrele (extensometrele) mecano-optice, prezentate la cap. 2 — sînt plasate, pe piesa sau structura ce face obiectul cercetării, de regulă, numai în momentul efectuării măsurărilor. După efectuarea măsurărilor acestea sînt ridicate de pe structură sau piesă. Deformaţia Δl a *bazei de măsurare* l_0 este dată de diferenţa dintre indicaţia tensometrului, corespunzătoare (modelului) piesei solicitate, şi indicaţia acestuia corespunzătoare piesei nesolicitate.

Tensometrele amovibile faţă de cele fixe prezintă următoarele avantaje:

— cu ajutorul bazei martor poate fi eliminată orice derivă ce apare în timpul măsurărilor;

— un singur tensometru (extensometru) este suficient pentru a face măsurări în mai multe puncte.

Scanned with OKEN Scanner

Inconvenientul principal al tensometrelor amovibile constă în faptul că acestea nu pot fi amplasate în regiunile greu accesibile ale structurii.

Deformaţiile materialului din interiorul structurilor se măsoară — — de regulă, — cu ajutorul tensometrelor (extensometrelor) înglobate în interiorul acestora, în momentul turnării (cazul structurilor din beton).

Această metodă prezintă avantaje şi dezavantaje. Dintre avantaje se menţionează :

— posibilitatea măsurării deformaţiilor în orice punct al structurii şi
— aparatul este perfect protejat contra agenţilor exteriori.

Ca dezavantaje se citează :

— dificultatea de a putea corecta eventualele erori (derive) şi de a repara eventualele pane ale aparatelor;
— prezenţa aparatului în interiorul structurii poate deranja cîmpul liniilor de forţă.

Precizia măsurării, este influenţată, aşa cum s-a arătat — mai ales în cazul cîmpurilor de deformaţii cu gradient mare — de lungimea *bazei de măsurare*, l_0. Cu cît aceasta este mai mică cu atît precizia este mai mare.

În cazul materialelor eterogene, cum este betonul, pentru a putea cunoaşte deformaţia materialului şi nu a unuia sau a altuia dintre constituenţi, se recomandă ca baza de măsurare să fie cît mai mare, cunoscînd că modulul de elasticitate al liantului este mult mai mic decît cel al granulelor de nisip. Din această cauză se recomandă ca $l_0 > 10\ d$, unde d este diametrul mediu al grăunţilor de nisip. Bineînţeles, şi în cazul acestor materiale, la alegerea bazei de măsurare se va ţine seama de gradientul deformaţiei în zona de măsurare, cunoscînd că extensometrul dă valoarea medie a deformaţiei existente între cele două puncte ce limitează baza de măsurare.

1.9. EFECTUL VARIAŢIILOR DE TEMPERATURĂ ÎN TENSOMETRIE

În principiu, se presupune că, în timpul măsurărilor tensometrice, proba sau structura ce face obiectul cercetării este în echilibru termic şi că aparatura de măsură are aceeaşi temperatură ca şi structura. În realitate, dacă încercările se fac în aer liber, şi chiar în cazul încercărilor efectuate în laborator, condiţiile de temperatură nu sînt totdeauna ideale, aceasta variind mai mult sau mai puţin în perioada în care se fac măsurările, mai ales dacă acestea sînt de lungă durată. În asemenea situaţii, dacă nu se iau măsuri pentru anihilarea efectului variaţiilor de temperatură, trebuie aduse corecţii corespunzătoare rezultatelor măsurărilor.

În cazul cercetărilor discontinue sau de lungă durată, efectuate cu ajutorul unor tensometre amovibile (cum sînt majoritatea extensometrelor mecano-optice) este indispensabil un etalon de invar, care permite evaluarea dilataţiei proprii a aparatului în timpul măsurării.

Dacă tensometrul sau traductorul este fixat pe structură şi temperatura acesteia variază în timpul efectuării măsurărilor, este necesar să se

ţină seamă de diferenţa dintre valorile coeficienţilor de dilataţie ale traductorului şi cel al materialului din care este confecţionată structura sau proba. De obicei se utilizează în acest scop, mai ales în cazul tensometriei electrice, fie traductoare cu autocompensare, fie un traductor de compensare aplicat pe o bară confecţionată din acelaşi material cu structura, fiind în echilibru termic cu aceasta, însă fără să fie solicitată mecanic.

În cazul fotoelasticimetriei trebuie avut în vedere că datorită structurii moleculare complexe pe care o prezintă majoritatea materialelor fotoelastice proprietăţile mecano-optice ale acestora (modulul de elasticitate şi constanta fotoelastică) sînt strîns legate de variaţiile de temperatură. Ca urmare cînd cercetările fotoelastice nu pot fi efectuate la temperaturi cuprinse între 18—25°C este necesar să se adapteze măsuri speciale de corecţie a rezultatelor sau să se utilizeze materiale stabile din punct de vedere al caracteristicilor mecano-optice (vezi cap. 4).

În cazul metodelor interferometrice prezentate la cap. 5 variaţiile de temperatură influenţează, de asemenea, rezultatele măsurărilor din care cauză se recomandă ca acestea să fie efectuate la temperaturi constante. În caz contrar trebuie aduse corecţii corespunzătoare rezultatelor.

1.10. CRITERII GENERALE PRIVIND ALEGEREA METODEI SAU TEHNICII TENSOMETRICE

Există diverse metode tensometrice şi pentru fiecare metodă au fost concepute diferite tipuri de aparate şi tehnici de măsurare, prezentînd fiecare anumite avantaje precum şi unele dezavantaje.

Un tensometru ideal trebuie să îndeplinească următoarele condiţii:

1°. Să aibă sensibilitate şi precizie mare;

2°. Să aibă dimensiuni mici şi greutate redusă;

3°. Măsurările să nu fie influenţate de condiţiile atmosferice;

4°. Să poată efectua măsurări atît în regim static cît şi în regim dinamic.

După cum se va vedea în conţinutul prezentei lucrări nici una dintre metodele şi tehnicile tensometrice cunoscute nu satisface toate condiţiile menţionate mai sus, fiecare metodă avînd un anumit domeniu de aplicabilitate.

La alegerea metodei sau tehnicii tensometrice se vor lua în considerare o serie de factori dintre care cei mai importanţi sînt:

— materialul, dimensiunile precum şi geometria modelului sau structurii ce face obiectul cercetării;

— numărul şi poziţia punctelor unde urmează să se efectueze determinarea deformaţiilor specifice;

— precizia ce se cere rezultatelor măsurărilor;

Scanned with OKEN Scanner

— durata măsurărilor şi condiţiile atmosferice în care acestea se execută ;

— robusteţea cerută aparaturii atît în timpul montării cît şi în perioada efectuării măsurărilor ;

— baza materială de care se dispune şi fondurile alocate pentru lucrare ;

— calificarea personalului cu care urmează să se efectueze măsurările şi interpretarea rezultatelor.

Există situaţii cînd, la aceeaşi lucrare, este indicat să se utilizeze două sau chiar mai multe metode sau tehnici tensometrice, cum este cazul modelelor sau structurilor cu forme complexe unde prezenţa concentratorilor de tensiuni este inevitabilă. În asemenea cazuri, pentru regiunile cu concentratori vor fi utilizate metode cu mare sensibilitate cum sînt metodele interfermetrice. La sfîrşitul volumului II se dau indicaţii detaliate privind selectarea metodelor şi tehnicilor tensometrice.

1.11. EVOLUŢIA ŞI PERSPECTIVELE METODELOR ŞI TEHNICILOR TENSOMETRICE

Măsurarea deformaţiilor suferite de organele de maşini şi elementele de construcţii sub acţiunea sarcinilor exterioare a căpătat o deosebită însemnătate din momentul cînd, în secolul al XVII-lea Robert Hooke a arătat, în urma încercărilor efectuate, că pentru majoritatea materialelor de construcţii există o legătură liniară între deformaţiile specifice şi tensiuni, pînă la o limită a acestora.

Primele încercări privind determinarea deformaţiilor au constat în măsurarea cu ajutorul micrometrului cu şurub a valorii absolute a variaţiei lungimii pieselor sub acţiunea forţelor la care acestea erau supuse. Împărţind deformaţia măsurată la distanţa iniţială dintre punctele de măsură, numită *bază de măsurare*, se obţine lungirea, respectiv, scurtarea specifică. Deformaţia specifică astfel determinată reprezintă deformaţia specifică medie corespunzătoare distanţei dintre punctele de măsură l_0, neputîndu-se obţine, pe această cale valorile deformaţiilor specifice locale, a căror valoare poate să difere sensibil de valoarea deformaţiei medii, diferenţa fiind cu atît mai mare cu cît gradientul deformaţiilor este mai mare.

Deoarece valorile deformaţiilor specifice reversibile, pentru marea majoritate a materialelor utilizate în construcţii, au valori foarte mici, de ordinul a 10^{-3}, dispozitivele utilizate pentru măsurarea acestora (extensometre respectiv tensometre (vezi § 1.1.) sînt înzestrate cu diferite sisteme de amplificare.

Astfel, în cazul extensometrelor mecanice amplificarea deformaţiei măsurate se face prin sisteme mecanice de pîrghii. La ora actuală se cons-

Scanned with OKEN Scanner

truiesc tensometre mecanice cu un raport de multiplicare de 1 : 2000 avînd baza de măsurare $l_0 = 10 - 100$ mm.

Manipularea razei de lumină se poate face mult mai uşor decît manipularea dispozitivelor mecanice, deoarece raza de lumină este fără greutate şi frecările sînt eliminate, de aceea, s-au făcut încercări pentru a utiliza raza de lumină la măsurarea deformaţiilor realizîndu-se, astfel, extensometre ale căror sisteme optice amintesc sistemul de pîrghii al extensometrelor mecanice, sensibilitatea lor fiind considerabil mai ridicată, decît a extensometrelor mecanice. Pot fi măsurate cu aceste dispozitive deformaţii specifice de ordinul a $0{,}2 \cdot 10^{-5}$, cu o bază minimă de măsurare $l_0 = 6$ mm.

O sensibilitate ridicată se realizează şi cu extensometrele acustice şi cu cele pneumatice, care însă, la ora actuală, au o utilizare mai restrînsă, fiind mai puţin comode.

Nu de mult a fost realizat un extensometru fotoelastic, bazat pe o combinaţie de mărimi mecanice, optice şi electrice, cu care se pot obţine măriri de 30.000 ori la o bază de $l_0 = 1{,}5$ mm. Avînd un preţ de cost ridicat, acest extensometru este puţin utilizat.

La începutul secolului nostru a fost pusă la punct o altă metodă tensometrică : fotoelasticitatea, cu ajutorul căreia se poate determina nu numai mărimea ei şi distribuţia tensiunilor în modelul supus cercetării.

După circa patru decenii a fost dezvoltată şi utilizată pe scară industrială tensometria electrică şi în deosebi cea cu traductoare rezistive (TER). Aceasta, spre deosebire de fotoelasticitate şi de metodele interferometrice (moiré, holografie ş.a), dă starea de deformaţie punctuală şi nu legea generală de variaţie a acesteia ; prezintă, însă avantajul că încercările pot fi efectuate chiar pe construcţiile reale. În plus, faţă de celelalte tehnici tensometrice, tensometria electrică rezistivă prezintă avantajul că pot fi măsurate deformaţiile simultan, fără dificultăţi, după două sau trei direcţii — cu ajutorul rozetelor tensometrice (vezi tabelul 1.5).

Între timp au fost dezvoltate şi alte metode şi tehnici tensometrice (cu raze X, cu lacuri casante, cu ultrasunete, prin analogie electrică ş.a.), care, din punct de vedere industrial au mai mică importanţă, dar completează, în anumite cazuri, metodele amintite mai sus.

În ultimele două decenii, a căpătat o puternică dezvoltare tensometria bazată pe fenomenul moiré cunoscută şi sub denumirea de *metoda reţelelor*, iar în ultimii ani s-a dezvoltat o altă metodă interferometrică „holografia".

Cu ajutorul metodelor interferometrice se pun în evidenţă, ca şi în cazul fotoelasticităţii, familii de curbe ce definesc starea de deformaţie, respectiv de tensiuni, deci fac posibilă vizualizarea întregului cîmp de deformaţii. Spre deosebire de fotoelasticitate, cercetările, în cazul acestor metode, nu sînt limitate la modele confecţionate din materiale transparente, cu proprietăţi de birefrigerenţă. Acestea se confecţionează, de regulă, chiar din materialul din care se execută construcţia ce face obiectul

Scanned with OKEN Scanner

cercetării. În plus, metodele interferometrice oferă posibilitatea de a se determina direct mărimea și distribuția deformațiilor specifice din relații pur geometrice fără intervenția vreunui fenomen fizic intermediar și pot fi utilizate, spre deosebire de celelalte metode tensometrice, la studiul comportării materialelor la temperaturi înalte.

Se poate afirma că utilizarea metodelor interferometrice începe acolo unde se termină posibilitățile metodelor tensometrice clasice și în anumite cazuri le completează pe acestea.

De subliniat că toate metodele tensometrice prezentate în lucrarea de față cu excepția metodei ce utilizează razele X (paragraful 8.5) măsoară direct numai deformațiile produse de sarcinile exterioare nu și pe cele datorită tensiunilor remanente.

Dintre metodele tensometrice cunoscute numai fotoelasticitatea și metodele interferometrice pot fi utilizate pentru determinarea stării de deformație și de tensiuni în cazul structurilor supuse la solicitări triaxiale. Aceste metode prin utilizarea de fascicule laser au dovedit largi posibilități de investigație la studii, în regim dinamic, rezolvînd probleme — cum este cea a propagării undelor de șoc, care în trecut nu și-au găsit rezolvarea.

Metodele tensometrice — dată fiind marea lor eficiență — sînt în continuă dezvoltare și perfecționare, îmbogățindu-se de la an la an cu noi tehnici și procedee de lucru. Pentru sporirea sensibilității și preciziei măsurărilor, precum și a productivității, la construirea aparaturii utilizate și la prelucrarea rezultatelor sînt utilizate cele mai recente cuceriri ale științei și, în deosebi, cele din domeniul electronicii și ale opticii.

BIBLIOGRAFIE

1. BUZDUGAN, GH., *Rezistența materialelor*, Editura tehnică București, 1975.
2. CARACOSTEA, A. ș.a., *Manual pentru calculul construcțiilor*, Editura Tehnică, București, 1959.
3. DALLY, W. J., RILEY, F. W., *Experimental stress analysis*, Mc Graw-Hil Book Company, New-York-Sidney, 1964.
4. DANTU, P., *Note sur la rectification des curbes experimentales* Analyse des contraintes nr. 7, 1966.
5. DURELLI, A. J., PHILLIPS, E. A., TSAO, C. H., *Introduction to the Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1958.
6. EFTIMIE AL., *Rezistența materialelor*, vol. 1., Institutul politehnic Iași, 1975.

Scanned with OKEN Scanner

7. HETENYI, M., *Handbooc experimental stress analysis*, John Willey end Sons New York — 1950.
8. HORBANIUC, D., *Rezistența materialelor*, vol. 1, Institutul politehnic Iași, 1973.
9. KAMMERER, A., *Bases théoriques des méthodes extensometriques*, Journale d'Extensometrie — 1967, (Laboratoire National d'Essais-Paris).
10. LEIRIS, H., *But et principes de l'extensometrie*, Extensometrie, 1967 (Laboratoire National d'Essais-Paris).
11. MOCANU, D. R., BUGA M., GEORGESCU C., *Determinarea experimentală a eforturilor unitare*, Editura Transporturilor și Telecomunicațiilor, 1966.
12. MOCANU, D. R., BUGA, M., BRATES M., *Calcule de rezistență cu specific feroviar*, vol. II, Editura Căilor Ferate, 1958.
13. MOCANU, D. R., BURADA, C., BUGA M., BRATEȘ, M., *Calcule de rezistență, probleme speciale din domeniu feroviar*, CDPT—M.T., București, 1971.
14. STAN, D. A., *Rezistența materialelor*, Editura didactică și pedagogică, București, 1967.
15. SECLHLER, E. E., *Elasticity in Engineering*, John Wiley și Sons Inc., New York, 1952.
16. TEODORESCU, C. C., MOCANU, D. R., *Rezistența materialelor*, vol. I. Editura C.F., București, 1956.
17. TRIPA, M., *Rezistența materialelor*, Editura didactică și pedagogică, București, 1967.
18. TIMOSHENKO, S. P., *Théorie de l'élasticité*, Paris, Liege, Libraire Politechnique Ch. Bérnager, 1948.
19. VOCKE, W., ULLMANN, K., *Experimentell Dehnungsanalyse*. Dehnigitter und Moiréverfahren, VEB, Fachbuch. verlag Leipzig, 1974.
20. * * * *Manualul inginerului mecanic*, Vol. I, Editura tehnică, București, 1973.

Scanned with OKEN Scanner

2

EXTENSOMETRE MECANO-OPTICE

Prof. dr. doc. ing. D. R. MOCANU

2.1. GENERALITĂȚI

Cu ajutorul extensometrelor se măsoară variația distanței dintre două puncte de pe suprafața unei structuri sau probe. Distanța l_0 dintre punctele respective se numește *bază de măsurare*. Extensometrele mecano-optice pot fi utilizate — cu unele excepții — numai pentru determinarea deformațiilor suferite de fibrele exterioare ale structurii. Ele se compun, în general, din trei părți și anume:

— *vehiculul* care transmite deformația Δl a bazei de măsurare, l_0 la sistemul de amplificare;

— *sistemul de amplificare*;

— *sistemul de citire* sau de înregistrare a deformației, care depinde — în primul rînd — de tipul de amplificare adoptat.

2.2. EXTENSOMETRE MECANICE

Cele mai vechi soluții imaginate pentru amplificarea deplasărilor și deformațiilor sînt sistemele mecanice alcătuite din pîrghii sau angrenaje.

2.2.1. EXTENSOMETRE CU AMPLIFICARE PRIN ANGRENAJE

Dintre extensometrele cu angrenaj cel mai cunoscut este comparatorul, la care sistemul de amplificare este alcătuit dintr-un angrenaj de cremalieră cu pinion. Comparatorul este, de regulă, realizat sub formă de ceas. Acesta poate fi uilizat ca în fig. 2.1 unde baza de măsurare l_0 este fixă, sau ca în fig. 2.2, a, în care caz extensometrul se compune din:

— două cleme elastice a și b, legate între ele prin țevi telescopice;

— arcurile care presează clemele pe probă;

— comparatorul d montat pe țeava exterioară t_1, care este înșurubată în clema a;

— țeava interioară t_2, care este legată de clema *b* și de brațul comparatorului *d*.

Deformația probei, datorită solicitării la care aceasta este supusă, produce o deplasare coaxială a țevilor. Valoarea deplasării, care este egală cu deformația Δl a probei, se citește pe cadranul comparatorului.

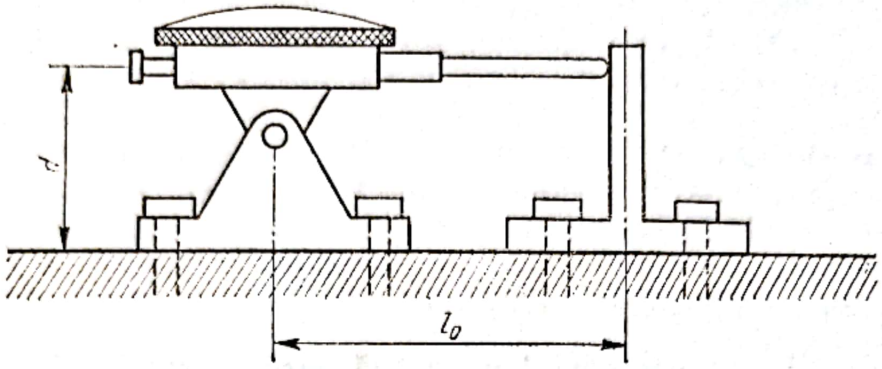


Fig. 2.1.

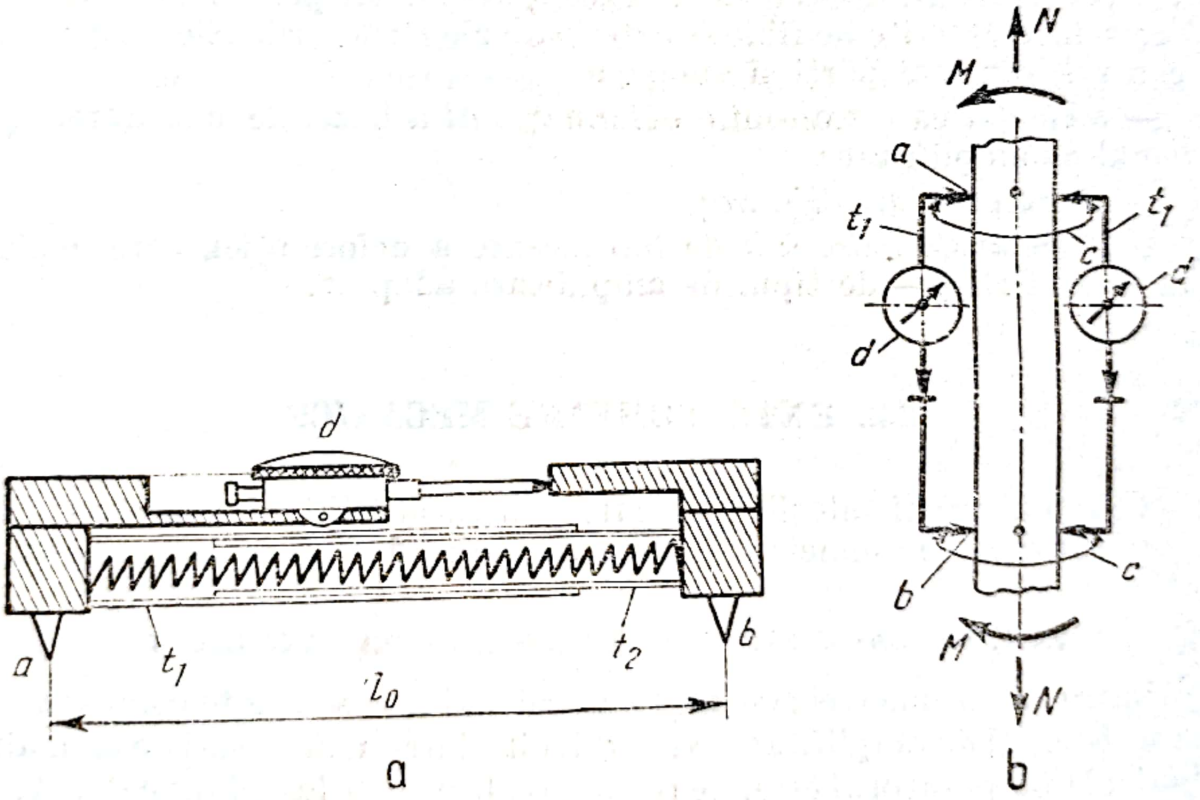


Fig. 2.2.

De obicei se folosesc două extensometre, montate față în față, pentru a se evita efectul de încovoiere, care poate să apară datorită unei solicitări excentrice a probei și să falsifice citirile (fig. 2.2, b). În timpul încercării, citirile se fac simultan la ambele ceasuri, iar în calcul se consideră media aritmetică a celor două citiri.

Scanned with OKEN Scanner

Aparatul poate fi folosit pentru măsurarea deformaţiilor la probe cu $d = 5 \ldots 40$ mm. Prin schimbarea ţevilor se pot face măsurători pen tru lungimile de 40, 100, 200 sau 240 mm.

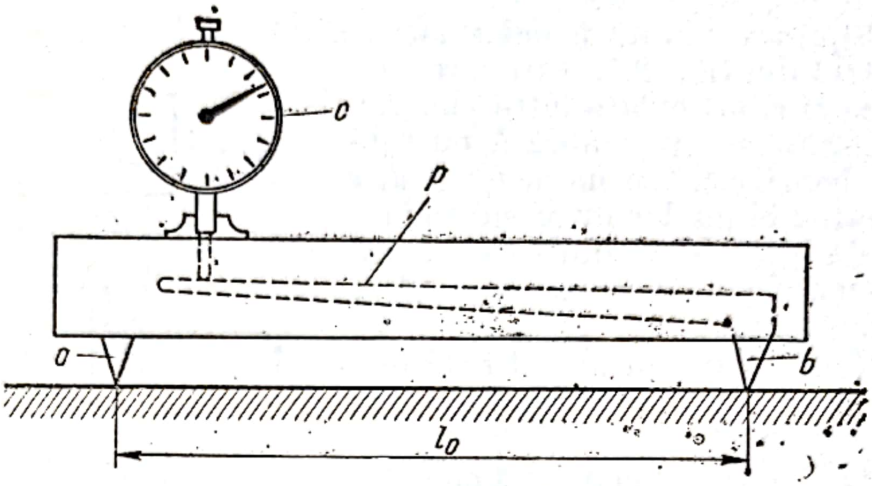


Fig. 2.3.

În fig. 2.3 se prezintă schematic un extensometru amovibil la care sistemul de amplificare este realizat printr-o combinaţie de pîrghie p şi angrenaj (comparator) c.

2.2.2. EXTENSOMETRE CU PÎRGHIE

În fig. 2.4 este arătat un extensometru cu pîrghie simplă. Acesta constă dintr-o bară b care are la un capăt cuţitul fix c şi la celălalt capăt are un loc de reazem în formă de V, în care este aşezat cuţitul mobil a în formă de prismă. Pe acesta este fixat un arătător f, care se roteşte în faţa cadranului gradat d pe care se citeşte mărimea deformaţiei. Lungimea

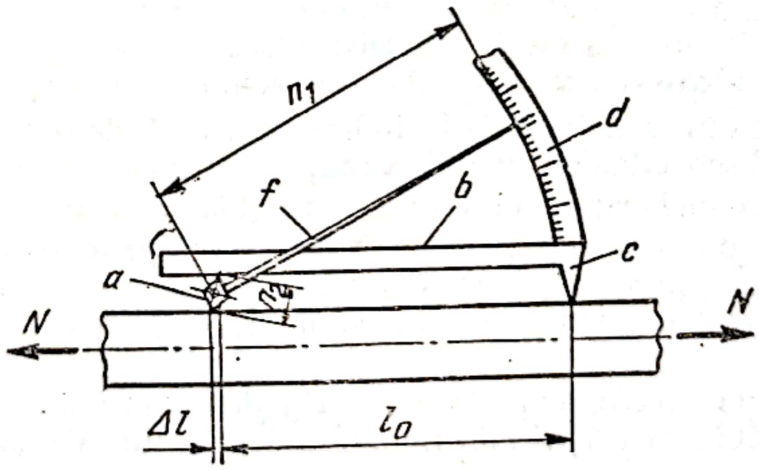


Fig. 2.4.

n_1 a arătătorului f şi înălţimea n_2 a cuţitului mobil determină raportul de multiplicare al aparatului, $K = \frac{n_1}{n_2}$.

Scanned with OKEN Scanner

Acest extensometru lucrează cu un raport de multiplicare $K = 50$. El poate fi folosit numai la măsurători statice şi în cazurile cînd sînt de determinat alungiri mari, în special la determinarea alungirii corespunzătoare limitei de curgere $\sigma_{0.2}$.

O multiplicare mărită a deformaţiei distanţei l_0 se poate obţine cu extensometrul din fig. 2.5, care are trei pîrghii, v, m şi r, articulate între ele. Articularea pîrghiilor este realizată cu ajutorul unor benzi elastice încrucişate d, e şi f, iar legarea pîrghiilor între ele se face cu lamele de oţel h şi i, din care cauză, la acest tensometru, transmisia se face fără jocuri.

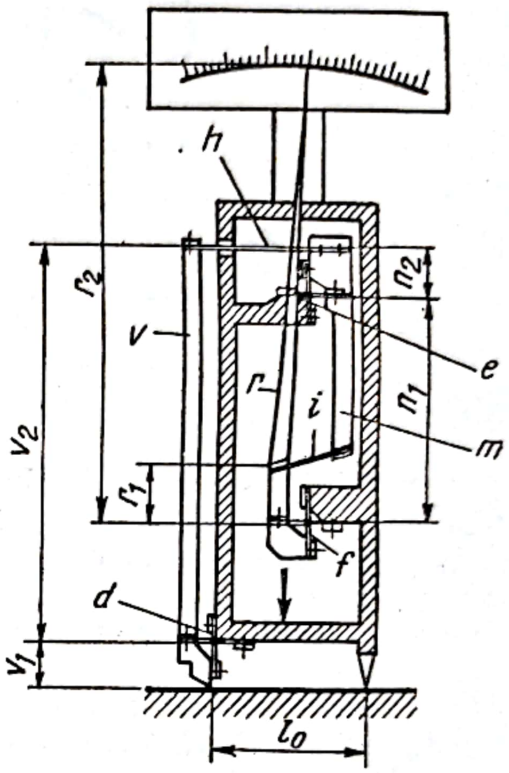


Fig. 2.5.

Raportul de multiplicare al deformaţiei este:

$$K = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{r_2}{r_1} = 2\,000 \ldots 3\,000.$$

Unul dintre cele mai folosite extensometre mecanice este extensometrul *Huggenberger* (fig. 2.6, b) a cărui principiu a fost utilizat pentru prima dată de *Okhuizen*. Cuţitul fix a este fixat de corpul c al extensometrului, iar cuţitul mobil b se poate mişca în locaşul tăiat în corpul extensometrului (fig. 2.6, a). Pîrghia d este legată de cuţitul mobil şi de pîrghia e cu punctul fix O prin piesa de legătură f în formă de T, care este ţinută în contact cu pîrghiile d şi e prin arcul m. Pîrghia e se mişcă în faţa cadranului n, gradat în mm, pe care se citeşte deformaţia piesei, mărită de K ori. Distanţa l_0 dintre cuţite este de regulă de 20 mm şi se poate scurta la 10 mm prin schimbarea cuţitului a.

Dacă piesa este solicitată la întindere, datorită deformaţiei, vîrful de jos al cuţitului b se va deplasa spre dreapta, iar pîrghia d se va roti spre stînga mişcînd piesa f, care la rîndul ei va mişca pîrghia w cu acul e. Acul extensometrului se poate duce la diviziunea zero prin rotirea şurubului s, care deplasează punctul fix O. Pentru ca pîrghiile să nu se depărteze, atunci cînd extensometrul este transportat, pîrghia d se poate bloca prin zăvorul z.

Raportul de multiplicare la acest tip de extensometru este cuprins între 300 şi 3 000, în funcţie de numărul de pîrghii. Valoarea raportului este dată de relaţia $K = \frac{H_1}{h_1} \cdot \frac{H_2}{h_2}$. Sensibilitatea aparatului este de 5.10^{-5}, bază $l_0 = 20$ mm. Datorită construcţiei sale robuste şi greutăţii relativ mici, extensometrul Huggenberger se pretează atît la măsurători de laborator, cît şi la măsurători pe construcţii sub sarcini (poduri, cazane

Scanned with OKEN Scanner

sub presiune ş.a.) El este folosit îndeosebi la cercetarea elementelor de construcţii din piatră şi beton.

De menţionat că acest tip de aparat este foarte sensibil la vibraţiile care apar în piesa supusă măsurărilor şi, în consecinţă, aproape orice vibraţie a piesei va face ca citirile să fie nesigure.

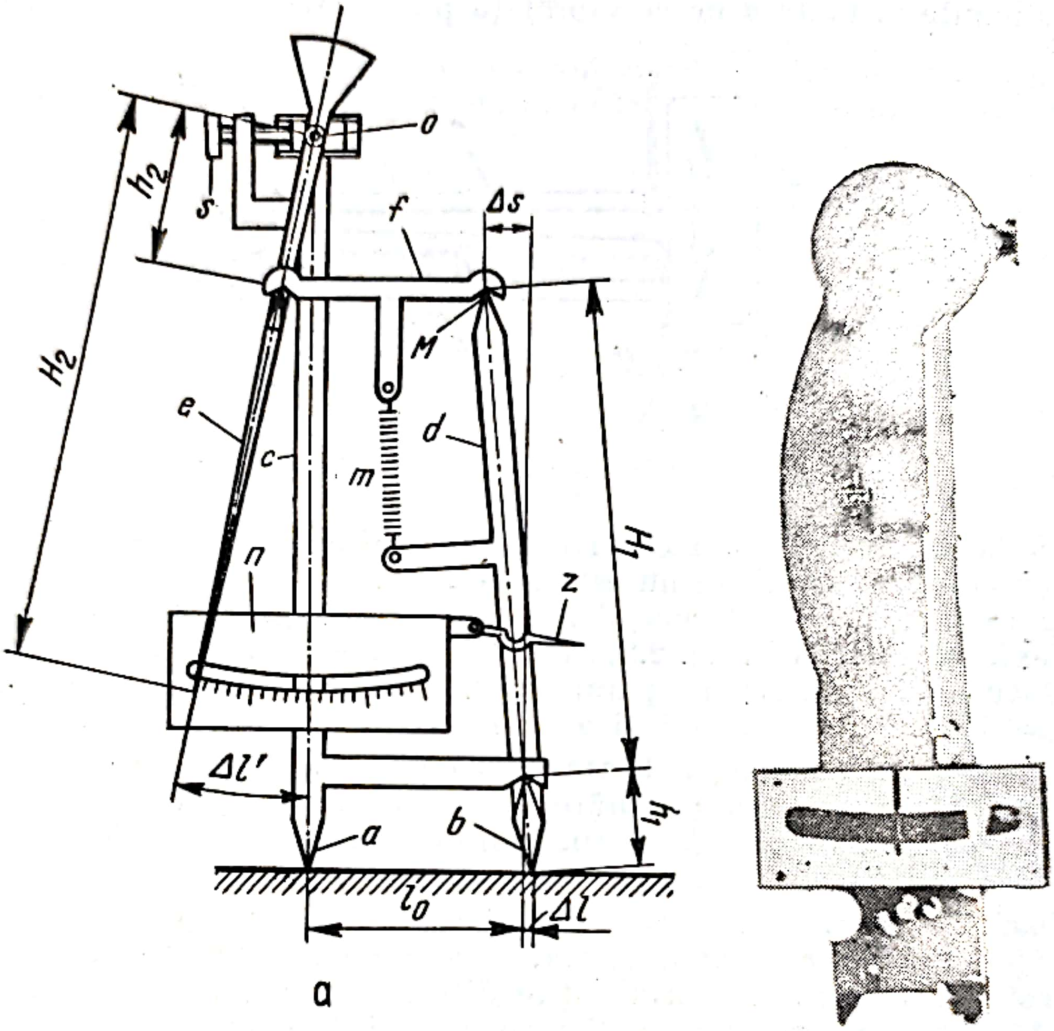


Fig. 2.6.

Datorită modului cum sînt construite mecanismele pîrghiilor, extensometrul poate fi folosit în orice poziţie, fără a pierde din sensibilitate şi precizie.

Dacă spaţiul disponibil pentru efectuarea măsurătorilor este redus, este indicată folosirea extensometrului Huggenberger tip En (fig. 2.7), notaţiile fiind aceleaşi ca în fig. 2.6.

La măsurarea deformaţiilor în regiuni cu crestături sau găuri, deci cu concentratori de tensiune, este necesar să se folosească extensometrul, Huggenberger tip Ax, la care distanţa dintre cuţitele *a* şi *b* poate fi reglată cu ajutorul unui şurub micrometric.

Scanned with OKEN Scanner

In cazul extensometrelor mecanice una din problemele principale este realizarea contactului dintre aparat şi piesa sau structura supusă cercetării, astfel încît acestea să înregistreze valoarea reală a deformaţiei. Soluţia cea mai simplă o constituie fixarea rigidă a extensometrului pe suprafaţa piesei aşa cum se arată în fig. 2.1. Neajunsul principal al acestui sistem de fixare constă în faptul că deformaţia măsurată corespunde unei anumite distanţe d de la suprafaţa piesei. Această distanţă trebuie

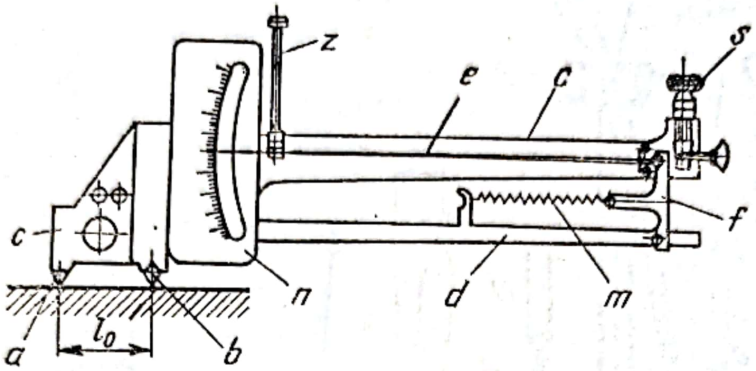


Fig. 2.7.

redusă la minimum, mai ales în cazurile cînd legea de repartiţie a tensiunilor pe grosimea piesei nu este cunoscută.

Dacă măsurarea deformaţiilor se face — în regiuni învecinate — cu două extensometre (vezi fig. 2.2) avînd distanţa d diferită, se poate stabili gradientul deformaţiilor şi separarea, prin calcul, a valorilor tensiunilor produse de solicitarea axială şi a celor produse de încovoiere.

Această metodă este indicată, îndeosebi, cînd separarea tensiunilor nu se poate face prin două măsurători — în dreptul aceleiaşi secţiuni—efectuate pe feţele opuse ale structurii, cum este cazul rezervoarelor umplute cu lichide sau cu materiale pulverizante.

Dacă fixarea pe structură a extensometrului se face prin vehicule cu cuţite (extensometre amovibile) sînt necesare unele precauţii. În cazul cînd contactul se asigură prin cuţite diedrice ascuţite, acestea pătrund lejer în material acroşîndu-se. Pentru a împiedica alunecarea, plasarea extensometrului pe structură se face cu o presiune cuprinsă între 1 şi 5 daN. O presiune mai mare nu este indicată deoarece ar putea influenţa distribuţia tensiunilor în regiunea piesei unde se măsoară deformaţi le.

Dacă vehiculul extensometrului în loc de cuţite diedrice are vîrfuri conice, în suprafaţa structurii, se practică, în prealabil, găuri ca în fig. 2.8, a. În cazul structurilor din beton aceste găuri sînt practicate în piese din oţel introduse în structură (fig. 2.8, b).

Este evident că greutatea proprie a extensometrului trebuie să fie redusă la minim iar centrul de greutate al acestuia să fie cît mai aproape de suprafaţa structuri .

Menţinerea contactului permanent între extensometru şi structură se face fie prin greutatea proprie a aparatului, fie prin fixarea acestuia cu

Scanned with OKEN Scanner

ajutorul unor resoarte sau benzi elastice, în funcție de poziția suprafeței structurii pe care se fac măsurările și de felul solicitărilor la care aceasta este supusă în exploatare. În anumite cazuri se utilizează dispozitive speciale de fixare. (fig. 2.9).

De regulă cadrul extensometrului este prevăzut cu două găuri pentru prinderea dispozitivului de fixat a acestuia pe structura supusă cercetării.

La fixarea tensometrului în cazul construcțiilor metalice din oțel se utilizează, cu succes, dispozitive cu electromagneți, alimentarea acestora

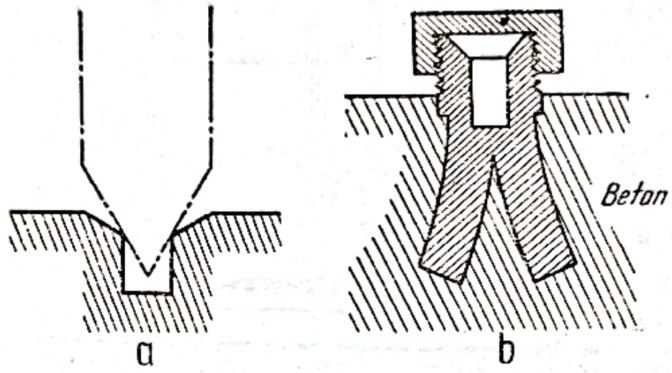


Fig. 2.8.

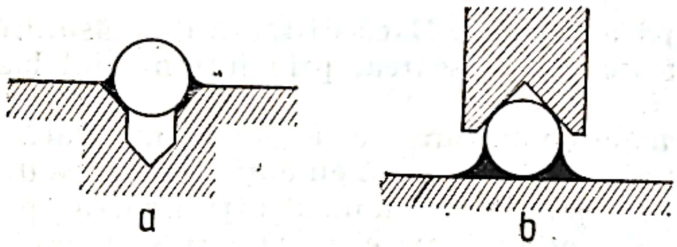


Fig. 2.9.

cu curent făcîndu-se de la un acumulator cu tensiunea de 12 sau 24 V. Cînd se utilizează astfel de dispozitive, extensometrele trebuie legate de construcție cu cîte un fir, pentru a împiedica căderea acestora în cazul cînd se întrerupe curentul.

Extensometrele mecanice pot fi echipate cu aparate de înregistrare a valorii deformațiilor cum sînt cele construite de firma Forest și Goodyear prezentate în lucrarea [5].

2.2.3. EXTENSOMETRUL JOHANSSON CU BANDĂ TORSIONATĂ

La aceste tensometre (fig. 2. 10), dispozitivul de multiplicare se compune dintr-o bară metalică răsucită g, cu secțiunea pătrată. Jumătate din bară este răsucită spre dreapta și cealaltă jumătate spre stînga. Un capăt

Scanned with OKEN Scanner

al barei este prins în clema f, iar capătul opus al barei este fixat de lama elastică h_1. Capătul lamei elastice h_1 se reazemă pe capătul şurubului de reglare s, prins în lamela d, care este fixată de scheletul c al aparatului prin şurubul s_1 peste lama h_2. La mijlocul barei este fixat acul indicator i, care oscilează în faţa cadranului k. Prin şurubul s, fără a schimba distanţa de măsurare l_0, bara se răsuceşte şi acul i vibrează în faţa cadranului k. Şurubul de reglare permite deci aducerea acului în poziţia zero, sau schim-

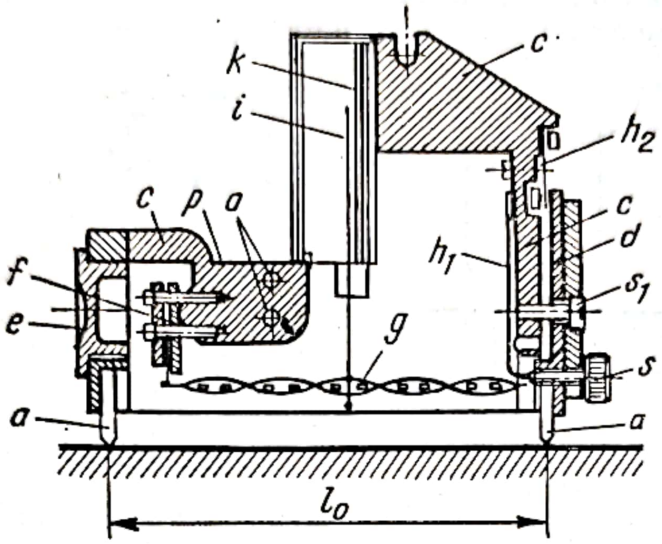


Fig. 2.10.

barea poziţiei după necesitate. Dacă distanţa de măsurare l_0 se modifică, cuţitul mobil b transmite mişcarea, prin intermediul barei de torsiune, acului indicator i.

Distanţa normală de măsurare este de 50 mm. Dacă se îndepărtează capacul e, se poate înşuruba o ţeavă cu cuţit, prin care distanţa de măsurare l_0 se poate mări pînă la 250 mm. Pentru fixarea aparatului pe piesa ce se cercetează se folosesc benzi elastice care se aşează peste spatele p al aparatului. În afară de aceasta corpul aparatului este prevăzut cu două găuri filetate o pentru prinderea dispozitivelor de fixare.

Aparatul se construieşte pentru multiplicări de 100, 200, 1 000 şi 5 000. Multiplicarea dorită depinde de lungimea l_0, de gradul de torsionare şi de materialul barei.

În cazul distanţelor de măsurare mici (sub 50 mm) se utilizează aparate cu bara torsionată aşezată în poziţie verticală. Cuţitul fix este montat pe o sanie ce se poate deplasa, astfel încît distanţa de măsurat să se poată regla de la 10 la 3 mm. Limita de indicare este de 0,01, respectiv 0,02 mm la o mărire de 2 000, respectiv 1 000 de ori. Greutatea aparatului de construcţie verticală este de 130 g, faţă de 450 g, cît are aparatul de construcţie orizontală.

Se menţionează că extensometrele mecanice, în general, cu excepţia celor cu repere materializate (vezi § 2.7) nu pot fi îndepărtate de pe piesă decît după ce s-a efectuat măsurarea.

Scanned with OKEN Scanner

2.3. EXTENSOMETRE MECANO-OPTICE CU OGLINZI

În cazul extensometrelor optice, măsurarea deformației se face prin intercalarea unui dispozitiv de rotire a unei oglinzi pe care cade o rază de lumină. Raza de lumină este reflectată de oglindă pe o scală. Mișcarea razei în lungul scalei va indica deformarea lungimii măsurate.

Teoretic, factorul de multiplicare al acestor aparate este nelimitat, însă dificultățile inerente ce se întîlnesc la sistemele optice limitează mărirea. Totuși extensometrele optice sînt considerate printre cele mai precise și sensibile aparate, la care frecările sînt reduse la minimum.

Citirea la aceste aparate se poate face direct sau cu luneta. Mai puțin utilizate sînt cele care folosesc interferența, cu toate că în anumite cazuri aduc servicii prețioase.

2.3.1. EXTENSOMETRUL CU MULTIPLICARE OPTICĂ ȘI MECANICĂ

Cel mai cunoscut aparat cu lunetă este aparatul cu oglindă Martens (fig. 2.11, a). Acesta se compune din rigla de măsurat d, care are la un capăt cuțitul a și la celălalt capăt o crestătură în care este așezat cuțitul b cu tăiș dublu și oglinda rotitoare c, fixată de cuțit. În timpul măsurării, rigla d este apăsată printr-o clemă elastică m sau printr-un fir de cauciuc, spre piesa de cercetat. La o schimbare a lungimii l_0, cuțitul b cu dublu tăiș se rotește și o dată cu el se rotește și oglinda c. Rezultatul acestei rotiri este citit cu ajutorul lunetei n pe scala k.

Cuțitul dublu b, care are înălțimea h, la o deformație Δl a lungimii de măsurat, se rotește cu unghiul α, a cărui valoare este dată de relația :

$$\sin \alpha = \frac{\Delta l}{h}$$

Dacă L este distanța de la scala de măsurat k pînă la oglindă, atunci, după legile reflexiei, are loc o deviație unghiulară a razei de lumină reflectată cu 2α și astfel deplasarea imaginii pe scală va fi

$$F = L \operatorname{tg} 2\alpha,$$

Raportul de transpunere este

$$V = \frac{h \sin \alpha}{L \operatorname{tg} 2\alpha};$$

De obicei unghiul α este mic, sub 2°, deci se poate lua $\sin \alpha \approx \alpha$ și $\operatorname{tg} 2\alpha \approx 2\alpha$, astfel că

$$V = \frac{h}{2L},$$

Scanned with OKEN Scanner

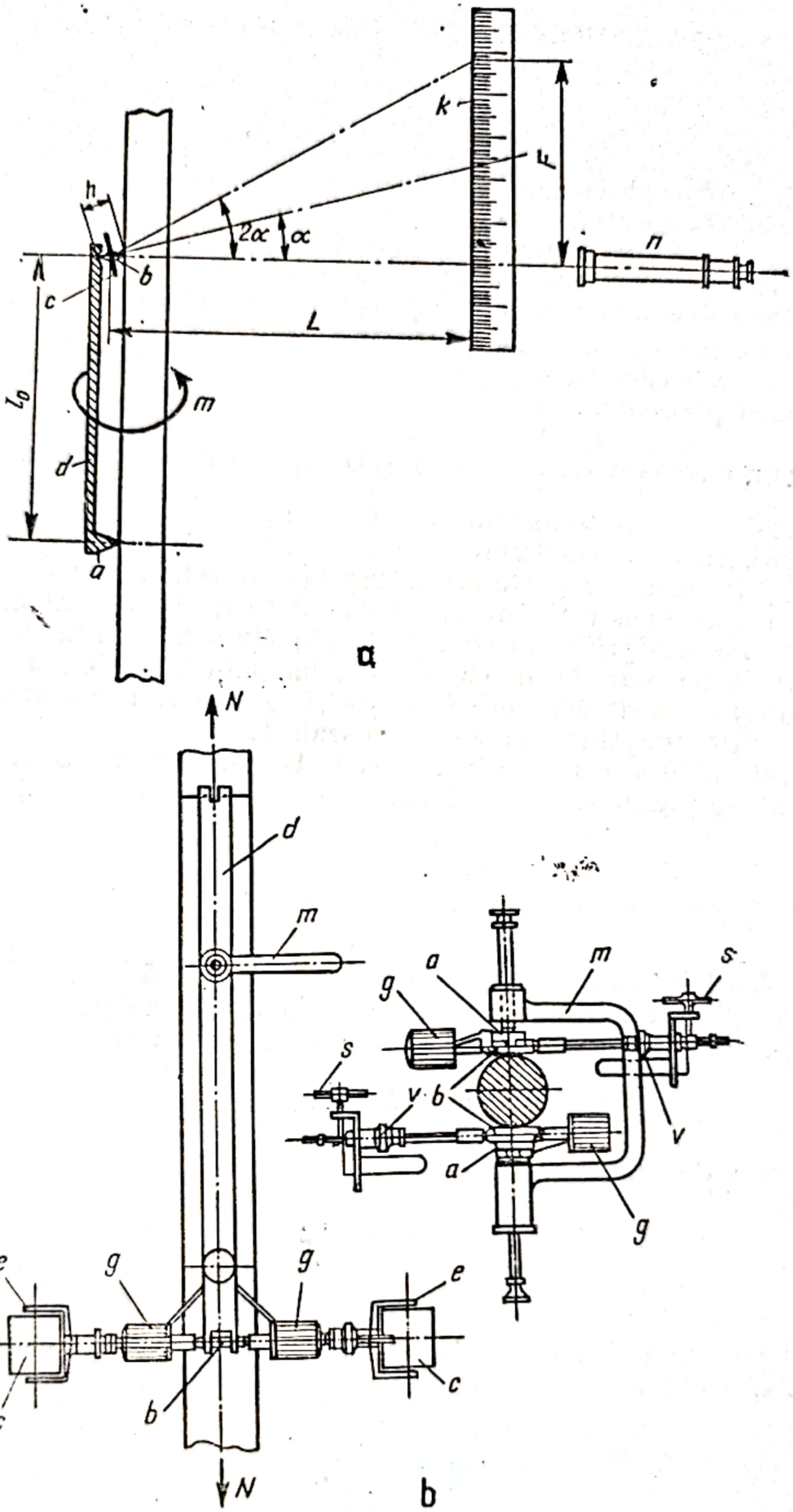


Fig. 2.11.

iar raportul de multiplicare este:

$$K = \frac{2L}{h}. \qquad (2.1)$$

Aparatele obişnuite au $h = 4$ mm şi $L = 1\,000$ mm, deci $K = \frac{2 \cdot 1000}{4} = 500$.

Se recomandă ca aparatele să fie înzestrate cu oglinzi care reflectă de pe partea superioară, cele de sticlă cu partea inferioară argintată putînd produce duble reflexii care influenţează negativ asupra preciziei de citire. La aşezarea cuţitului cu tăiş dublu b trebuie luate măsuri ca acesta să fie perfect perpendicular pe suprafaţa piesei.

Cu aparatele cu oglindă Martens se pot efectua măsurări pînă la o distanţă (bază) de măsurare de 25 mm. Ele sînt folosite la examinarea materialelor uzinale, la determinarea limitei de elasticitate şi a modulului de elasticitate. Influenţa încovoierii produse de eventuala prindere excentrică a piesei se evită prin aceea că se montează cîte două aparate pe probă, în părţi opuse.

Realizarea practică a aparatului Martens cu oglindă este arătată în fig. 2.11, b. Pe ambele părţi ale piesei este montat cîte un aparat. Cuţitele duble b sînt legate printr-un ax de furcile e în care sînt montate oglinzile plane c. La celălalt capăt al axului sînt montate contragreutăţile g. Articulaţiile v şi şuruburile de reglare s permit orientarea oglinzilor c înspre luneta de citire şi scală. Fixarea aparatelor pe probă se face cu ajutorul menghinei elastice m.

O multiplicare mai mare a deformaţiilor se poate realiza dacă, în afară de multiplicarea pe cale optică, se foloseşte şi o multiplicare mecanică prin intermediul unei pîrghii.

În fig. 2.11, c este arătat un asemenea aparat, construit de E. Preuss. Baza de măsurare l_0 este limitată de cele două cuţite cu tăiş dublu a şi b, care sînt şi picioarele braţelor celor două pîrghii mobile m şi n.

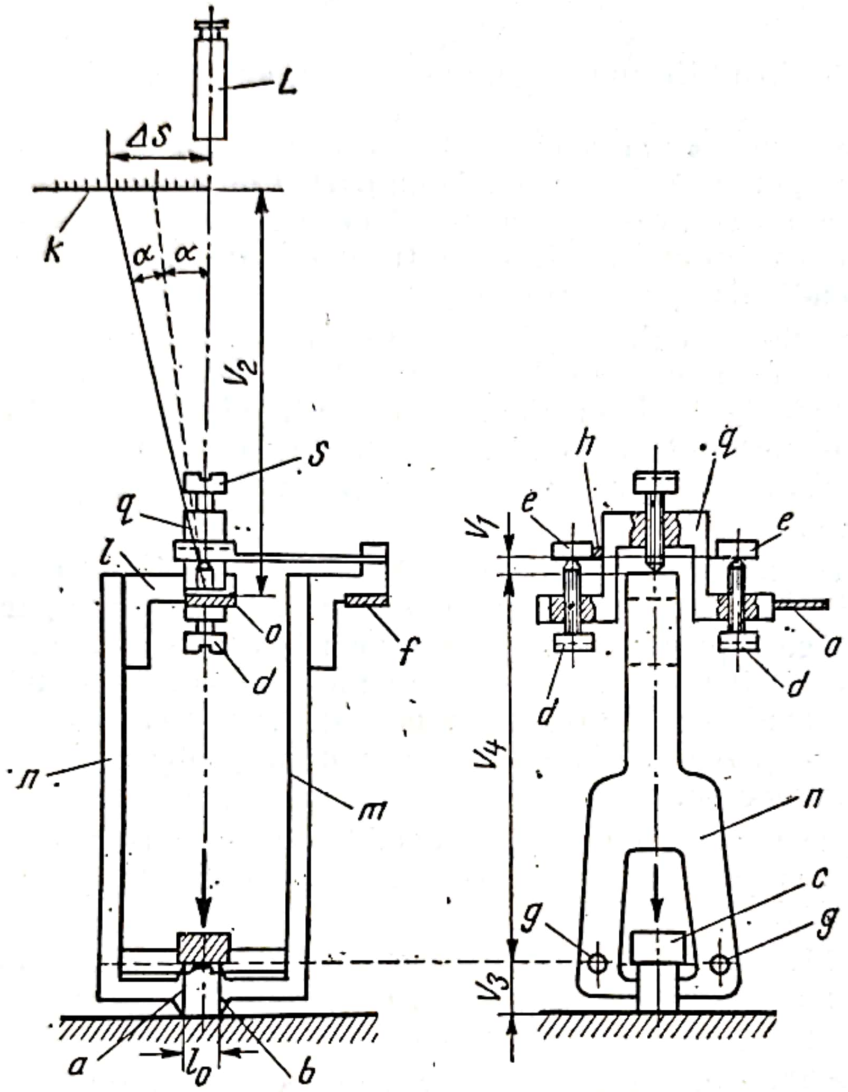
Cuţitele a şi b sînt presate pe piesa de cercetat prin intermediul piesei c, de aluminiu, care se aşază peste cuţite. Locurile de presare sînt punctele de rotire a pîrghiilor m şi n. Cele două lame de oţel g asigură poziţia şi paralelismul celor două pîrghii şi, în acelaşi timp, formează punctele de articulaţie pentru rotirea acestora. Pîrghia m poartă sus un braţ lateral de care este prinsă oglinda fixă f şi arcul plat bifurcat h. Folosirea oglinzii fixe permite deplasarea reciprocă a instrumentului care măsoară deformaţia şi a instrumentului de observare.

Pîrghia opusă n are la partea superioară braţul l care, în dreptul axei verticale a aparatului, prezintă o adîncitură sferică, în care se sprijină vîrful şurubului mijlociu s al jugului q, care poartă la capătul său oglinda rotitoare o. În cele două braţe ale jugului sînt alte şuruburi d, montate cu vîrfurile în sus.

Pe cele două şuruburi presează piesele e, care se află la capetele celor două braţe ale arcului plat h.

Scanned with OKEN Scanner

Vîrfurile celor două şuruburi (s şi d) sînt în acelaşi plan vertical. Distanţa vîrfului şurubului mijlociu s de la nivelul vîrfurilor şuruburilor d corespunde braţului de pîrghie l.



c

Fig. 2.11. c

Deformaţia se citeşte, ca şi la aparatul cu oglindă Martens, cu ajutorul lunetei L şi al scării k. Multiplicarea totală realizată de aparat este dată de relaţia :

$$K = 2 \cdot \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_4}{V_3} \tag{2.2}$$

deci

$$\Delta l = \frac{1}{K} \Delta s. \tag{2.3}$$

Scanned with OKEN Scanner

Acest aparat este construit pentru o bază de măsurare l_0 de 0,7, respectiv 3,3 mm, cu o distanţă între vîrfurile şuruburilor V_1=1, respectiv 2 mm şi lungimea de pîrghie V_4=40 mm.

Cunoscînd că distanţa dintre oglinda O şi scala k este $V_2 = 5$ mm, rezultă că multiplicarea aparatului este de 16 000 respectiv 8 000.

2.3.2. EXTENSOMETRUL MARTENS-HESSE

Acest aparat, prezentat schematic în fig. 2.12, a, are în locul oglinzii plane o oglindă concavă c, cu distanţa focală de 1 500 mm, fixată de cuţitul mobil cu dublu tăiş b. Lumina emisă de o sursă o, formată dintr-un bec cu un singur filament, este concentrată de o lentilă f şi reflectată de oglinda concavă c pe o scală k în formă de arc de cerc.

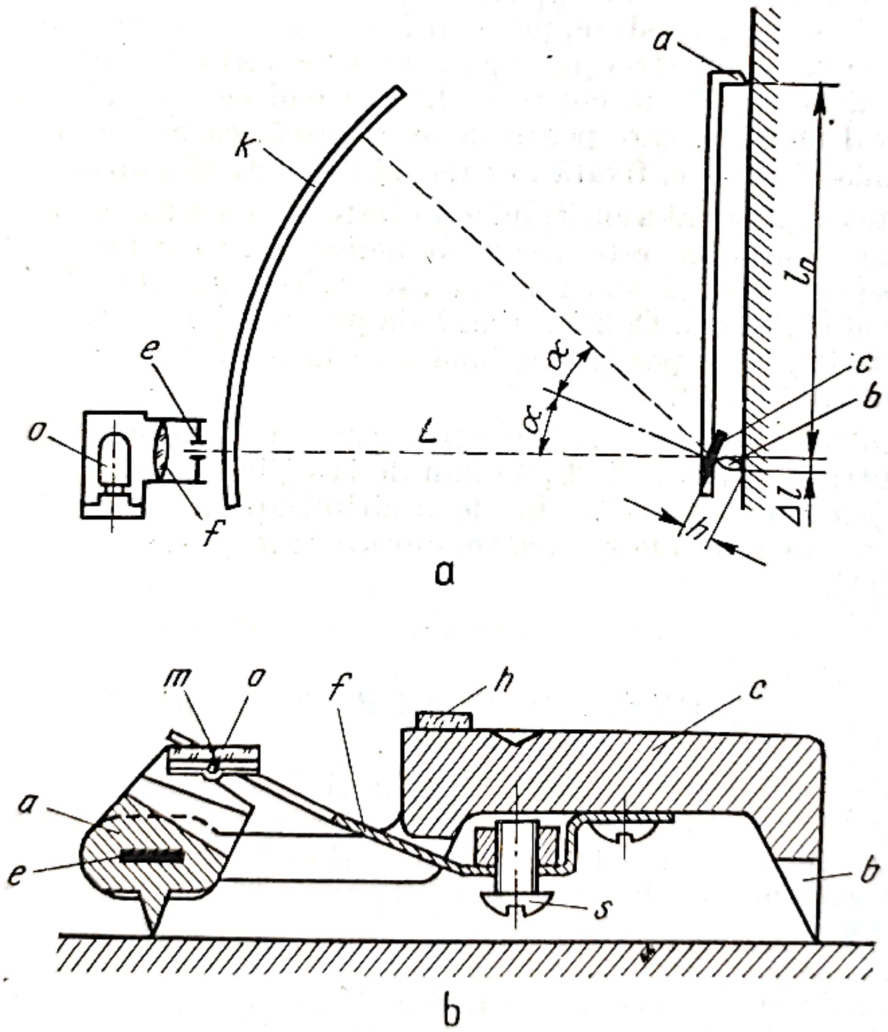


Fig. 2.12.

Pentru măsurările în spaţii puţin luminate se foloseşte ecranul de proiecţie e, a cărui imagine pe scala k apare ca o linie fină. Scala gradată k

Scanned with OKEN Scanner

este plasată în focarul oglinzii c, adică la distanţa $L = 1\,500$ mm şi are distanţa dintre diviziuni $i = 1{,}5$ mm. La o înălţime a cuţitului mobil $h = 4$ mm, rezultă coeficientul de multiplicare al aparatului

$$K = \frac{2L}{h \cdot i} = \frac{2 \cdot 1\,500}{4 \cdot 1{,}5} = 500.$$

Faţă de aparatul Martens (fig. 2.11, a) are avantajul că citirea, făcîndu-se cu ochiul liber, fără lunetă, se poate efectua o dată de mai mulţi observatori. La citirea cu luneta, ochiul oboseşte mai repede iar aranjarea oglinzilor la aceste aparate răpeşte mult timp. Mînuirea aparatelor Martens-Hesse este mult mai simplă, din care cauză sînt frecvent folosite în laboratoarele uzinale. La aceste aparate, în cazul solicitărilor variabile, se pot citi deformaţii cu frecvenţe pînă la 15 Hz.

Aparatul reprezentat în fig. 2.12, b, datorită distanţei mici de măsurare şi greutăţii proprii reduse, poate fi folosit la măsurări în locurile greu accesibile ale unei construcţii. Aparatul este format dintr-un cadru c care are la un capăt două cuţite b. La capătul celălalt al cadrului este aşezat cuţitul mobil a, care poate să se rotească, ca mijloc de articulaţie servind banda elastică e, fixată în capătul bifurcat al cadrului c.

Pe partea superioară a cuţitului mobil este fixat un ax m cu $d = 0{,}5$mm. De mijlocul axului m este fixată o oglindă o. Cînd piesa este supusă solicitării, se deformează şi, ca urmare, se învîrte cuţitul a, deci şi axul m, şi odată cu el oglinda o. Oglinda fixă h de pe cadrul aparatului arată rotirile acestuia. Reglarea poziţiei oglinzii o se face cu ajutorul şurubului s, prin intermediul lamei f.

Instrumentul este construit pentru distanţe de măsurare l_0 de 5 ... 20 mm. Pentru o distanţă de 1 500 mm de la oglinda o pînă la ecranul cu scală, se ajunge la un coeficient de multiplicare $K = 1\,000 \ldots 10\,000$. Alte variante de tensometre mecano-optice sînt prezentate în lucrările [3], [5] şi [11].

2.4. EXTENSOMETRE PNEUMATICE

Funcţionarea extensometrelor pneumatice se bazează pe schimbarea de stare a gazelor (în cazul de faţă a aerului), la curgerea printr-o conductă cu variaţii de secţiune. Unul dintre cele mai utilizate extensometre pneumatice este cel construit de firma SOLEX, prezentat schematic în fig. 2.13. Aerul comprimat primit de la o sursă trece printr-un reductor de presiune R în ţeava C, cu secţiune suficient de mare. Ţeava este cufundată pînă la înălţimea presiunii coloanei de apă H. Presiúnea p_1 din ţeava C corespunde întotdeauna presiunii coloanei de apă H.

Camera B este legată cu a doua ţeavă D care este prevăzută cu o scală pe care se poate citi înălţimea h. Din camera B aerul trece prin conducta F spre orificiul de evacuare E. Presiunea p_2 a aerului din ţeava D corespunde coloanei de apă h.

Scanned with OKEN Scanner

Cuţitul fix b este solidar cu cadrul S al dispozitivului de măsurat, iar cuţitul mobil a este legat de pîrghia P aşezată în faţa orificiului de evacuare la distanţa e_0 care este funcţie de deformaţia Δl a bazei de măsurare l_0.

Din condiţia de continuitate, care precizează că, la o curgere staţionară, prin fiecare secţiune transversală curge aceeaşi cantitate de aer, în ipoteza

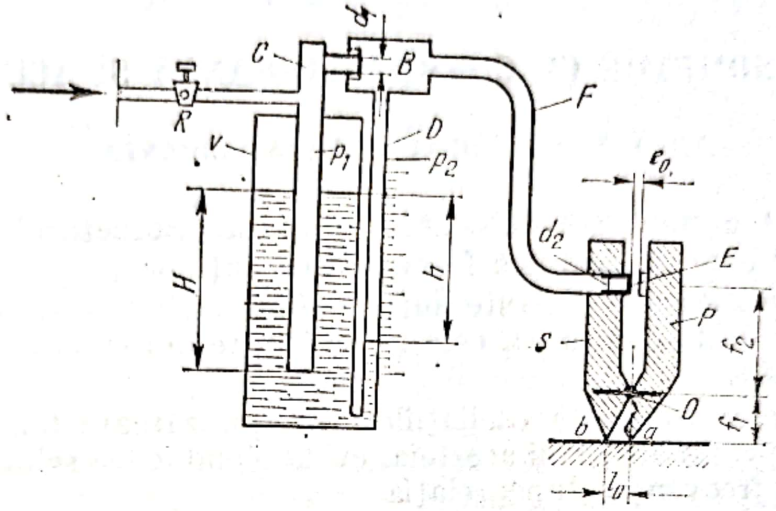


Fig. 2.13.

că se neglijează frecările şi că temperatura în timpul măsurării rămîne constantă, rezultă [11]

$$h = \frac{H}{1 + \frac{S_2^2}{S_1^2}} \tag{2.4}$$

unde:

S_1 este secţiunea orificiului de trecere, $S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$;

S_2 — secţiunea orificiului de evacuare $S_2 = \pi d_2 \cdot e$.

Este clar că funcţia $h = f(S_2)$, care caracterizează funcţionarea extensometrului pneumatic, nu este liniară. Ea are însă un punct de inflexiune cînd $\frac{h}{H} = \frac{3}{4}$. Pentru valori din vecinătatea acestui punct funcţia $h = f(S_2)$ se poate considera liniară. În această regiune coeficientul de multiplicare este maxim.

Luînd în considerare multiplicarea $K_m = \frac{f_2}{f_1}$ datorită pîrghiei P cu punctul de articulaţie O, coeficientul total de multiplicare este $K = K_m \cdot K_p$, unde K_p este coeficientul de multiplicare pneumatică al aparatului.

Extensometrele pneumatice, avînd dimensiuni reduse (înălţimea 30 — 40 mm) şi baza l_0 foarte scurtă (2 mm) şi, în acelaşi timp, o sensibili-

Scanned with OKEN Scanner

tate ridicată, de ordinul a $5 \cdot 10^{-5}$, sînt indicate pentru măsurări de deformaţii în regiuni cu concentratori de tensiuni, chiar în cazul cînd acestea sînt plasate în locuri greu accesibile.

În lucrările [10], [12], [13] sînt prezentate şi alte tipuri de tensometre pneumatice.

2.5. TENSOMETRE CU COARDĂ VIBRANTĂ ŞI ACUSTICE*)

2.5.1. TENSOMETRE CU COARDA VIBRANTĂ

În cazul tensometrelor cu coardă vibrantă, traductorul folosit este o coardă de oţel care îşi modifică frecvenţa oscilaţiilor proprii în funcţie de tensiunea mecanică la care este supusă. Coarda, cu secţiune neglijabilă în comparaţie cu lungimea sa, este întinsă între doi suporţi fixaţi pe elementul cercetat.

Dacă f_0 este frecvenţa oscilaţiilor corespunzătoare tensiunii iniţiale a corzii, modificarea lungimii acesteia, cu Δl, conduce la schimbarea corespunzătoare a frecvenţei după relaţia

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{4 l_0 \delta}{E}(f^2 - f_0^2) \tag{2.5}$$

unde:

δ este densitatea oţelului corzii, în $\frac{\text{daN} \cdot \text{s}^2}{\text{cm}^4}$

E — modulul de elasticitate al oţelului, în $\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$

f — frecvenţa proprie a corzii, după deformarea acesteia cu Δl, în Hz.

Problema de măsurare care se pune este a determinării frecvenţei f a corzii.

Tensometrele cu coardă vibrantă au o sensibilitate ridicată; cu ajutorul lor pot fi măsurate, cu uşurinţă, deformaţii specifice de ordinul a 10^{-6}. Astfel dacă se utilizează o coardă cu $l_0 = 10$ cm, cu o tensiune iniţială corespunzătoare unei frecvenţe $f_0 = 200$ Hz şi dacă există posibilitatea aprecierii unei variaţii de frecvenţă de 0,5 Hz, aplicînd relaţia (2.5) rezultă

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot 10^2 \cdot 8{,}1 \cdot 10^{-6}}{2{,}1 \cdot 10^6}(200 \cdot 5^2 - 200^2) \approx 3 \cdot 10^{-7}.$$

---

* Cu ajutorul acestora se măsoară direct deformaţia specifică.

Scanned with OKEN Scanner

Deci o valoare mai mică decît cea menţionată mai sus, care dă posibilitatea aprecierii unei variaţii de tensiune.

$$\sigma = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}1 \cdot 10^{6} = 0{,}63 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}, \quad \text{în cazul oţelurilor şi}$$

$$\sigma = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}2 \cdot 10^{6} = 0{,}06 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}, \quad \text{în cazul betoanelor.}$$

Din relaţia (2.5) se observă că sensibilitatea creşte mult dacă se reduce lungimea corzii. Dacă pentru o coardă de lungime l_0

$$\Delta l = \frac{4l^3 \delta}{E}(f - f_0) = \frac{4l^3 \delta}{E} K \tag{2.6}$$

pentru o coardă de n ori mai scurtă rezultă

$$\frac{\Delta l}{n} = \frac{4l^3}{n^3 E} K. \tag{2.7}$$

Din compararea celor două relaţii rezultă influenţa lungimii corzii asupra sensibilităţii tensometrului. Utilizînd montajul din fig. 2.14, unde baza de măsurare l_0 este ocupată de o tijă şi o coardă (a cărei secţiune este neglijabilă în comparaţie cu cea a tijei), deformaţia specifică corespunzătoare distanţei l_0 este preluată în întregime de coardă şi, ca urmare, în coardă apar tensiuni mai mari decît în piesa supusă cercetării, deci la o variaţie mică a lui l_0 corespund variaţii apreciabile ale frecvenţei corzii.

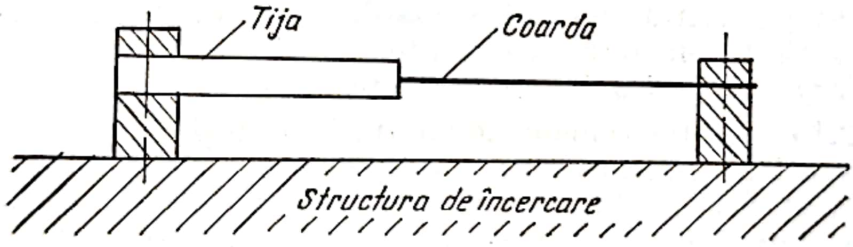


Fig. 2.14.

În consecinţă acest montaj permite obţinerea unei sensibilităţi sporite pentru ε chiar dacă aprecierea frecvenţei f a corzii se face cu o precizie mai redusă.

În afară de sensibilitate ridicată, tensometrele cu coardă vibrantă mai prezintă următoarele avantaje:

— transmiterea unui semnal electric, de o anumită frecvenţă, nu modifică valoarea acestei mărimi, indiferent de pierderile rezistive, sau de altă natură, din lanţul înregistrator;

— în aceleaşi condiţii de solicitare şi temperatură, traductorul cu coardă vibrantă îşi păstrează, vreme îndelungată, aceeaşi frecvenţă proprie din care cauză utilizarea lui este indicată, în deosebi, unde măsurările tensometrice sînt de lungă durată.

Scanned with OKEN Scanner

Schema unui extensometru cu coardă vibrantă este prezentată în fig. 2.15.

Deformaţia piesei este transmisă la o coardă de oţel pretensionată C, — montată între cuţitul fix a şi altul mobil b — a cărei frecvenţă proprie este astfel modificată. Excitarea coardei în noua frecvenţă proprie se face, de regulă, printr-un şoc de curent electric cu ajutorul unui mic elec-

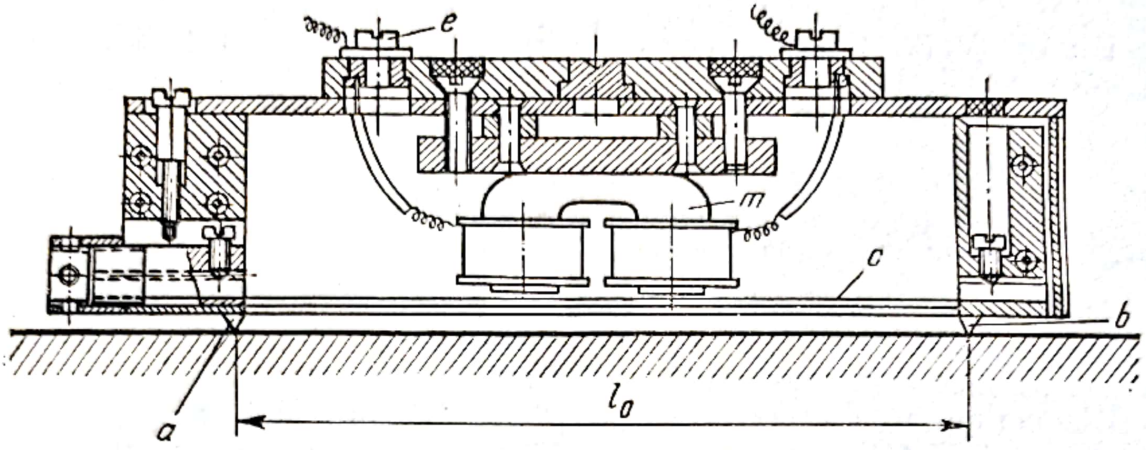


Fig. 2.15.

tromagnet m, ai cărui poli sînt plasaţi foarte aproape de coardă. După ce coarda a primit şocul electric, oscilează amortizat cu frecvenţa ei proprie şi induce în bobinele electromagnetului, de la care a primit şocul, o tensiune alternativă de aceeaşi frecvenţă. Frecvenţa curentului electric indus este comparată cu frecvenţa unei alte coarde, a cărei lungime este variată manual pînă cînd cele două frecvenţe coincid. Prin aceasta, frecvenţa coardei vibrante şi deci alungirea ei este determinată.

În fig. 2.16 se arată schematic modul de funcţionare al întregii instalaţii. Emiţătorul E legat strîns de piesa de cercetat, conţine coarda vibrantă c. Aparatul de recepţie R conţine coarda de comparaţie n, în care sînt excitate vibraţii întreţinute, frecvenţa lor reglîndu-se de la butonul k, prin rotirea căruia se variază lungimea coardei n.

Apăsînd pe butonul p se produce un şoc de curent în bobinele electromagnetului m_1 al emiţătorului şi în felul acesta coarda c va oscila cu frecvenţa proprie. Comparaţia frecvenţelor celor două coarde se face pe cale electrooptică. Pentru aceasta, tensiunile alternative din electromagneţii emiţătorului E şi receptorului R sînt duse prin cîte un amplificator W respectiv V, la cîte o pereche de plăci-pilot ale unui tub Braun t; cele două perechi de plăci fiind dispuse perpendicular una pe alta.

Tensiunea coardei de comparat n se reglează cu ajutorul butonului k, astfel încît coarda să aibă acelaşi număr de oscilaţii ca şi coarda c. Acordul celor două frecvenţe se manifestă pe ecranul luminos cînd cele două figuri au forma unei curbe închise, de formă eliptică, fără să se intersecteze.

Emiţătoarele se construiesc pentru lungimi de măsurare de 100, 50 şi 20 mm. Domeniul de măsurare al celor trei tipuri de emiţătoare cores-

punde la tensiuni de 1 000, 2 000, 4 000 daN/cm². De regulă se folosește aproximativ jumătate din domeniul de utilizare cu eroare maximă de ±5%.

La emițătoarele pentru lungimi de măsurare mici (20 mm), din cauza spațiului redus, electromagnetul are forma din fig. 2.17, la care reglarea

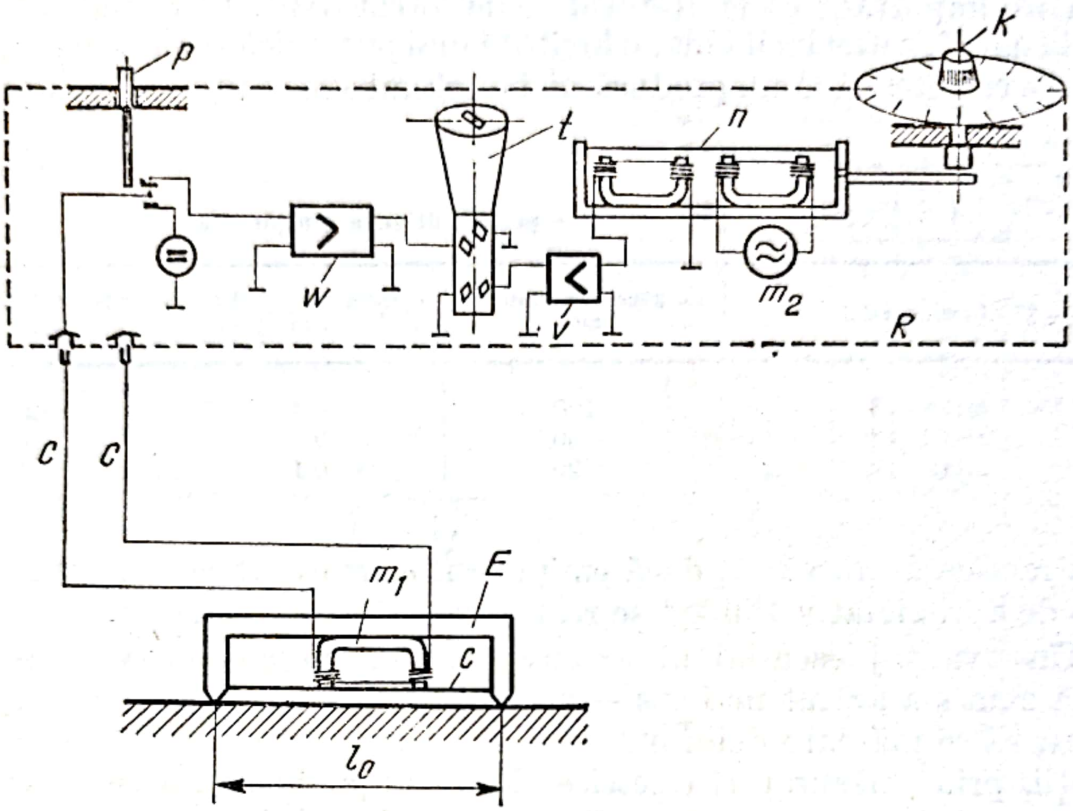


Fig. 2.16.

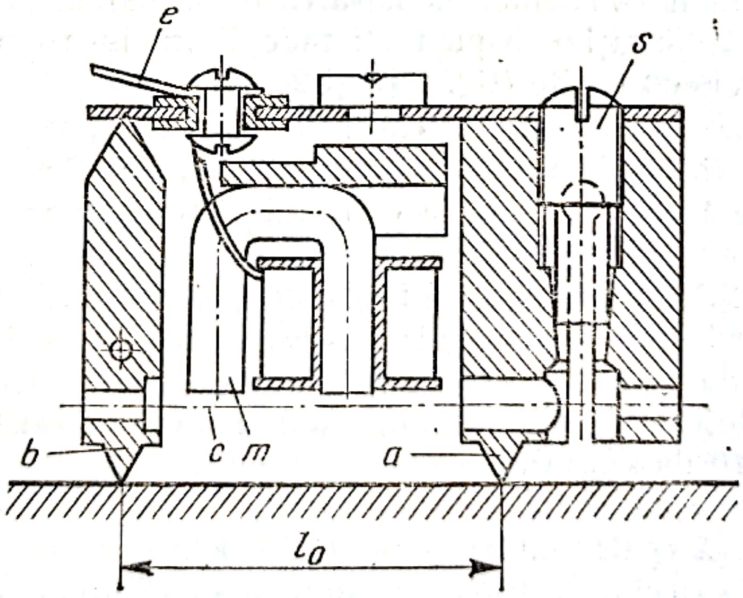


Fig. 2.17.

tensiunii coardei *c*, se face cu bacuri conice prin șurubul de reglare *s* (celelalte notații au aceeași semnificație ca în fig. 2.16). Pentru a aduce coarda în domeniul de frecvență favorabilă măsurării, corespunzător domeniului

Scanned with OKEN Scanner

de frecvenţă al receptorului, coarda vibrantă a emiţătorului este pretensionată înainte de măsurare. Forţa de pretensionare este cu atît mai mare cu cît secţiunea coardei este mai mare. În tabelul 2.1 sînt date valorile recomandate pentru forţa de pretensionare corespunzătoare diferitelor tipuri de emiţătoare.

Este important ca emiţătorul să fie corect fixat. El trebuie să aibă o poziţie sigură, astfel încît chiar o lovitură mai puternică suferită de construcţia ce se cercetează să nu producă nici o schimbare în reglarea receptorului.

Tabelul 2.1.

Forţa de pretensionare pentru diferite emiţătoare

Tipul emiţătorului	Lungimea de măsurare mm	Diametrul coardei mm	Forţa de pretensionare N
MDS 13	100	0,4	42,50
MDS 14	50	0,3	9,00
MDS 13	20	0,1	0,60

Practica a arătat că, dacă emiţătorul este aşezat pe construcţie cu o forţă de aproximativ 150 kg, se realizează o fixare satisfăcătoare.

Un avantaj esenţial al extensometrelor cu coardă vibrantă este — aşa cum s-a arătat mai sus — acela că ele dau posibiltatea, timp îndelungat, să se măsoare deformaţiile care se produc în elementele unei construcţii, prin măsurători electrice la distanţă. Pentru a se putea folosi acest avantaj este necesar ca fixarea emiţătorului pe construcţie să se facă în aşa fel, încît să excludă deplasarea lui în cursul funcţionării îndelungate. Această condiţie nu poate fi îndeplinită în toate situaţiile de către emiţătoarele cu cuţite (fig. 2.16 şi 2.17).

Pentru fixarea sigură a unui emiţător cu coardă, se recomandă să se practice, mai întîi, în piesa de cercetat două găuri cu diametrul de 10 mm şi adîncimea de 15 . . . 20 mm, la distanţă egală cu baza de măsurare a aparatului, de exemplu 200 mm. În aceste găuri se înşurubează două şuruburi *s* (fig. 2.18, a) pe care se introduc cîte o piuliţă şi contrapiuliţă, astfel încît găurile prevăzute pentru introducerea coardei *a*, transversale pe axa şuruburilor, să aibă axa în continuare. Apoi se trece prin ambele găuri o sîrmă de oţel de circa 5 mm diametru avînd rezistenţa de rupere de minimum 140 daN/mm^2.

Fixarea coardei *a* se face cu două ştifturi conice *e*. Sîrma este pretensionată cu o forţă egală cu aproximativ 1/4 din rezistenţa de rupere, avînd în această situaţie o frecvenţă proprie de aproximativ 700 Hz.

Pentru excitarea electromagnetică şi totodată pentru recepţionarea oscilaţiilor proprii ale coardei *a* serveşte bobina dublă *b* cu miez magnetic, Bobina este montată pe partea interioară a unui capac de protecţie *d*,

Scanned with OKEN Scanner

care se fixează pe piesă cu ajutorul unor şuruburi, protejînd emiţătorul contra vătămărilor, umidităţii şi murdăriei, capacul fiind acoperit cu un strat de bitum.

Fixarea emiţătorului descrisă mai sus are avantajul, faţă de fixarea prin apăsare cu ajutorul cuţitelor, că asigură stabilitatea emiţătorului contra zguduirilor puternice şi a vibraţiilor, dar are dezavantajul că în

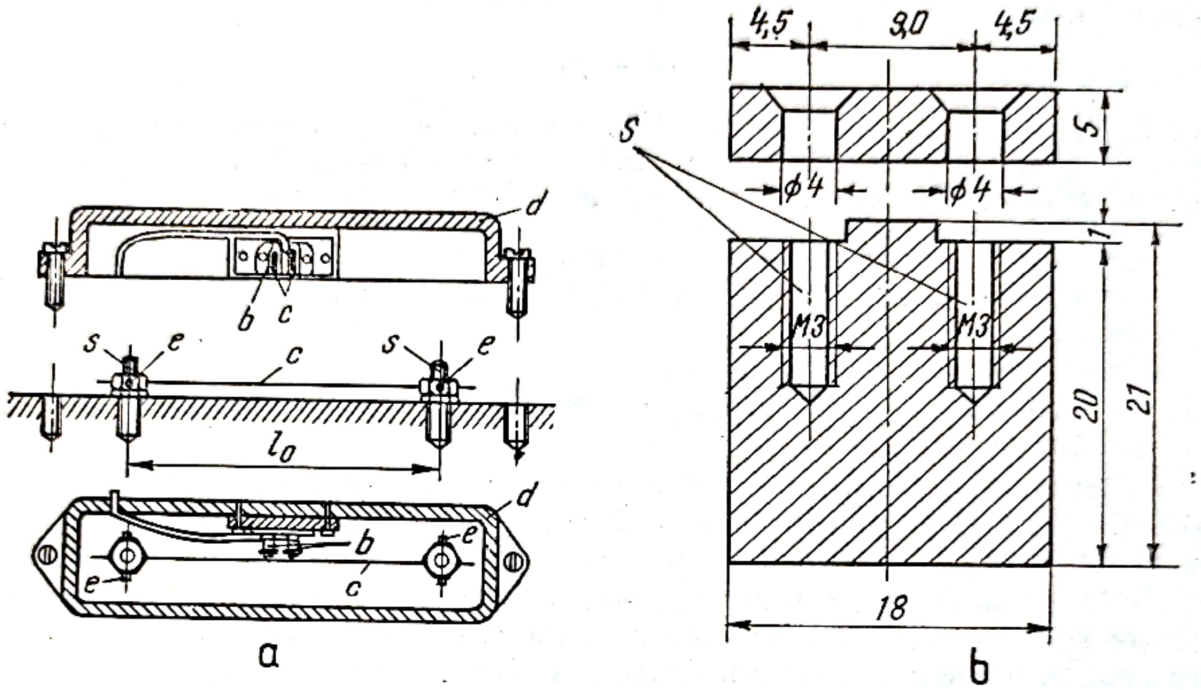


Fig. 2.18.

fluxul de forţe intră găurile pentru şuruburile de fixare. Calcule, folosind teoria elasticităţii, dovedesc că acest efect perturbator este neglijabil dacă diametrul şuruburilor este mai mic de 1/16 din lungimea bazei de măsurare l_0, care se consideră egală cu distanţa dintre mijloacele ştifturilor conice e.

Eroarea obişnuită ce se face la măsura deformaţiilor cu ajutorul tensometrelor cu coardă vibrantă este de ordinul a 5 . . . 10 μ pe metru. Cauza principală a acestei erori este incertitudinea cu care se apreciază momentul cînd corzile c şi n (vezi fig. 2.16) au aceeaşi frecvenţă a vibraţiilor proprii.

Utilizarea acestor tensometre este indicată, în special, aşa cum s-a menţionat în cazul încercărilor de lungă durată şi cu bază de măsurare mare. Ele sînt utilizate cu succes la studiul fluajului în cazul betonului, încercare care durează, în general, mai mulţi ani.

La INCERC — Filiala Iaşi *) a fost conceput şi realizat un tensometru cu coardă vibrantă pentru măsurarea deformaţiilor specifice la construcţii

*) Autori: prof. G. Dalbon şi ing. N. Groper.

Scanned with OKEN Scanner

din beton. Coarda vibrantă a aparatului este o coardă de vioară „mi" întinsă între doi suporţi a căror formă şi dimensiuni sînt date în fig. 2.18, b.

Suportul este introdus într-o gaură, cu diametrul mai mare cu 2 . . . 3 mm decît diametrul acestuia, la o adîncime de cca 17 mm. Găurile în beton se fac cu un burghiu special prevăzut cu plăcuţă Vidia. Spaţiul dintre suporţii de fixare a corzii şi beton este umplut cu un liant.

Prin strîngerea corzii în suport, forţa F' la care s-ar produce alunecarea sîrmei este

$$F' = 2N_t\mu$$

unde N_t este forţa axială din şuruburile S şi μ coeficientul de frecare dintre coardă şi suport. Pentru $N_t = 5$ daN şi $\mu = 0{,}3$ rezultă $F' = 3$ daN, în timp ce efortul în coarda „mi" cu, $d = 0{,}2$ mm, pentru $\varepsilon = 10^{-3}$, este

$$F = \varepsilon EA = 10^{-3} \cdot 2{,}1 \cdot 10^{6} \frac{\pi \cdot 0{,}02^2}{4} = 0{,}65 \text{ daN}$$

deci o forţă mult mai mică decît cea la care s-ar putea produce lunecarea corzii din suporţi.

Punerea în vibraţie a corzii se face cu un electromagnet, similar cu cel din căştile folosite de radioamatori. Prin bobina acestuia trece un curent continuu timp de o fracţiune de secundă.

Un al doilea electromagnet — asemănător cu primul dar cu mai multe spire — constituie elementul principal al tensometrului. În timp ce coarda vibrează înterfierul format de ea şi miezul electromagnetului (care este un magnet permanent) se modifică, ca urmare variază fluxul magnetic ce trece prin bobină. Variaţia fluxului face să apară la capetele bobinei o tensiune electrică alternativă avînd frecvenţa egală cu frecvenţa oscilaţiilor corzii. Valoarea acestei tensiuni fiind de ordinul milivolţilor, poate fi studiată cu ajutorul unui osciloscop catodic cu amplificare corespunzătoare. Determinarea frecvenţei de lucru a corzii se face prin metoda figurilor Lissajous, comparînd frecvenţa tensiunii electrice, dată de bobina electromagnetului principal, cu cea dată de un generator de frecvenţă variabilă.

Precizia măsurării deformaţiei specifice ε depinde de stabilitatea frecvenţei dată de generatorul cu care se apreciază unisonul cu vibraţiile corzii. Cu generatorul de frecvenţă variabilă de tip RC pot fi măsurate deformaţii specifice de ordinul a $3 \ldots 5 \cdot 10^{-6}$.

În cazul măsurărilor de înaltă precizie, efectuate cu tensometrele cu coardă vibrantă, trebuie luate unele măsuri legate de dilatarea termică a corzii şi cea a materialului piesei de cercetat. În cazul betoanelor, care au coeficientul de dilatare termică $\alpha_t = 10^{-5}$, aproximativ egal cu cel al corzii, apare necesar ca în cazul măsurărilor care cer o sensibilitate de 10^{-6}, să se facă o termostatare care să asigure o diferenţă maximă de 0,1°C între material şi coardă. Aceasta, în practică, se realizează uşor deoarece coarda se găseşte în apropierea şi sub influenţa piesei de încercat, urmărind va-

Scanned with OKEN Scanner

riaţiile de temperatură ale acesteia. Dacă se acoperă coarda cu o cutie termoizolatoare se poate asigura o temperatură a corzii egală cu temperatura piesei.

Măsurările pentru determinarea frecvenţei f trebuie făcute la aproximativ aceeaşi temperatură la care a fost determinată frecvenţa f_0. Dacă acest lucru nu este posibil trebuie făcută corecţia termică corespunzătoare

2.5.2. TENSOMETRUL ACUSTIC

Funcţionarea tensometrelor acustice se bazează, ca şi cea a tensometrelor cu coarde vibrante, pe proprietatea coardelor de a avea frecvenţa proprie în funcţie de forţa de întindere la care este supusă coarda.

În esenţă, un astfel de aparat constă dintr-un fir, care este întins între doi suporţi fixaţi pe piesa de încercat, la o distanţă egală cu lungimea de măsurare l_0. Aparatul mai conţine un înregistrator magnetic care pune firul în vibraţie şi apoi transformă vibraţiile mecanice în impulsuri electrice. Deformaţia piesei ce se cercetează măreşte (sau micşorează) lungimea firului, ceea ce face ca frecvenţa vibraţiilor proprii ale firului să se schimbe. Interpretarea se face comparînd tonul creat de către vibraţia firului aparatului de măsură cu tonul dat de vibraţia unui fir etalon.

Aparatul receptor cu ajutorul căruia se interpretează valorile deformaţiilor indicate de firul aparatului de măsură este astfel montat, încît formează o singură unitate. Ca şi în cazul extensometrelor cu coardă vibrantă, receptorul poate fi întrebuinţat succesiv în legătură cu mai multe aparate de măsură. Acesta conţine : un fir standard ataşat la un şurub, care este astfel calibrat încît să indice solicitarea firului, o baterie necesară alimentării magneţilor care servesc la punerea în vibraţie a firelor aparatului de măsură, o unitate denumită pick-up, care pune în vibraţie firul etalon şi transformă vibraţiile în impulsuri electrice, un amplificator, o cască sau un difuzor, care permite compararea auditivă a vibraţiilor.

Volumul redus al aparatului precum şi manipularea sa relativ uşoară fac ca el să fie folosit la multe aplicaţii. Se recomandă, ca şi în cazul extensometrelor cu coardă vibrantă, ca firele folosite să fie din material cu acelaşi coeficient de dilatare ca materialul piesei de cercetat, pentru a reduce efectul variaţiei de temperatură.

2.6. EXTENSOMETRE CU REPERE MATERIALIZATE

Dacă este necesar să se măsoare deformaţiile specifice, în multe locuri, cu un singur aparat, sau cînd măsurările trebuie să se facă la intervale de timp lungi, este indicată utilizarea extensometrelor cu repere materializate. În acest caz, de regulă, reperele sînt formate din bile sferice fixate pe piesa sau structura ce face obiectul cercetării la distanţe egale cu baza de măsurare l_0. Fixarea bilelor pe suprafaţa piesei sau structurii se face utilizînd una din soluţiile prezentate în fig. 2.9.

Scanned with OKEN Scanner

În fig. 2.19, se dă schema extensometrului mecanic tip PFENDER fabricat de firma Mohr şi Federhaff (R.F. Germania) care, la ora actuală este cel mai utilizat extensometru cu repere materializate.

Baza de măsurare a aparatului poate fi de 20, 40, 60 şi 100 mm şi este delimitată prin bile de oţel (fig. 2.9, b) fixate pe piesa de cercetat cu ajutorul unui dispozitiv livrat de firmă odată cu aparatul.

Extensometrul se compune din : corpul c, piciorul fix a, piciorul mobil b, — ce face corp comun cu pîrghia p, — ceasul comparator d şi pîrghia de blocare f.

Aşezînd, pe cele două bile fixate, la distanţa l_0, pe piesă, cele două picioare ale aparatului, se citeşte poziţia acului indicator corespunzătoare

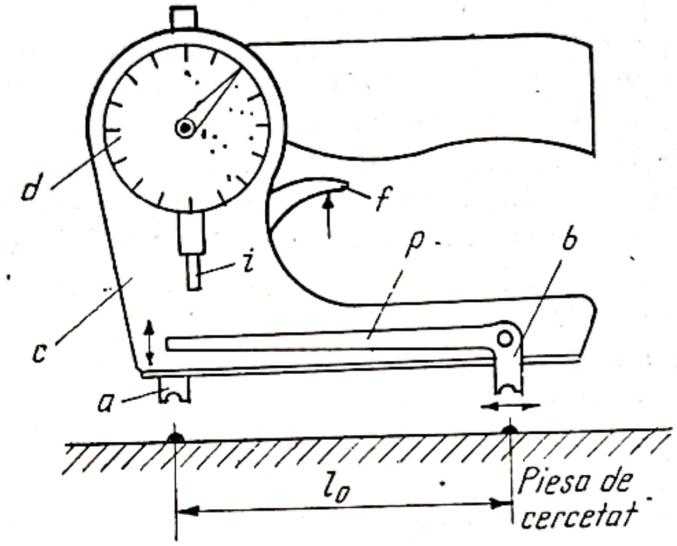


Fig. 2.19.

stării iniţiale. După ce piesa a fost solicitată, operaţia se repetă — la diferite intervale de timp — citind variaţia distanţei dintre repere, deci deformaţia pe direcţia ce trece prin centrul celor două bile.

Fazele măsurării sînt următoarele :

1°. *Aşezarea aparatului pe bile* (fig. 20, a). Comparatorul este deblocat (pîrghia f nu este acţionată), deci pîrghia p se poate mişca liber în jurul punctului de articulaţie.

2°. *Măsurarea deformaţiei* (fig. 20,b). Aparatul se apasă uşor pe cele două bile, se blochează pîrghia p, apăsînd pe pîrghia f. Comparatorul indică valoarea deformaţie bazei de măsurare (iniţial acul comparator este adus la O).

3°. *Citirea* (fig. 20,c). Pentru a se citi cu uşurinţă valoarea deformaţiei, indicată de acul comparatorului, aparatul se ridică într-o poziţie convenabilă, pîrghia f rămînînd nemişcată (aceeaşi poziţie ca în fig. 20, b).

În fig. 2.21 se arată o fotografie a aparatului, luată în timp ce se efectuează măsurarea deformaţiei.

Scanned with OKEN Scanner

Aplicație. Ca exemplu de utilizare a tensometrului cu repere materializate, descris mai sus, se prezintă rezultatul măsurătorilor efectuate la traversa tip cheson — executată în construcție sudată — utilizată la ridicarea locomotivei Diesel — electrică de 2100 CP fabricată la Intreprinderea „Electroputere"-Craiova*).

Măsurarea deformațiilor s-a făcut cu un singur extensometru, cu baza de măsurare $l_0 = 100$ mm, care este delimitată prin bile de oțel (fig. 2.9). Direcțiile tensiunilor principale

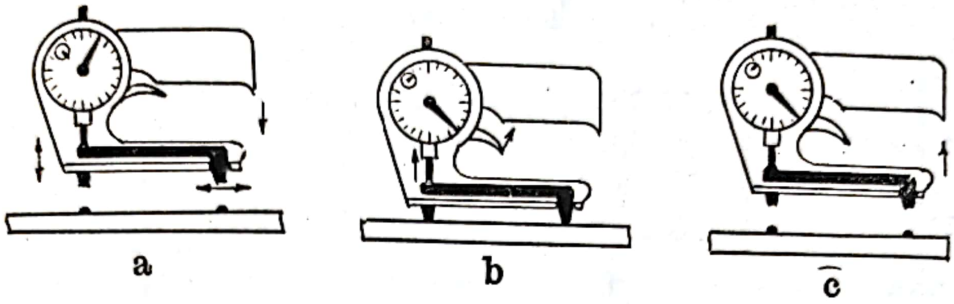


Fig. 2.20.

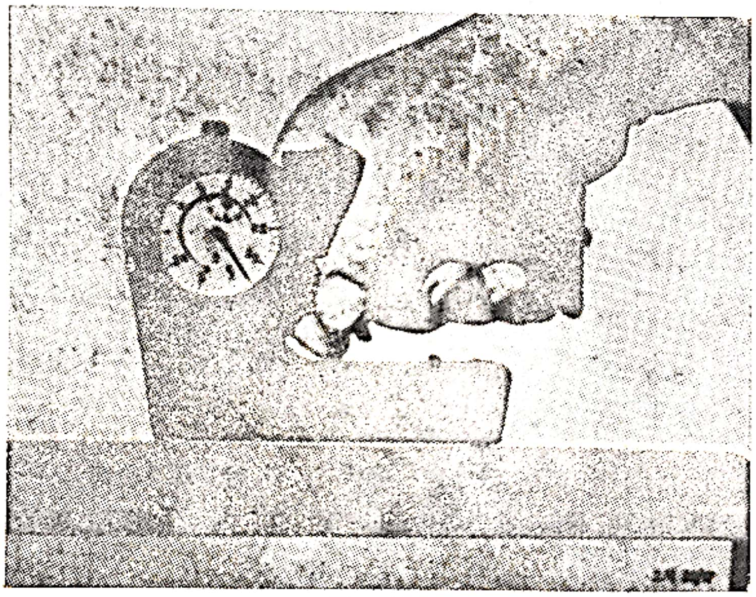


Fig. 2.21.

nefiind cunoscute s-au efectuat măsurări după trei direcții situate la 45° formînd, astfel, o rozetă dreptunghiulară (poz. 1. tab. 1.5) unde indicele α corespunde direcției orizontale, β direcția înclinată la 45° și γ direcția verticală, rozeta fiind formată din 6 bile.

Cele două platbande care formează inima traversei au fost împărțite în zece zone notate cu *1...10* (fig. 2.22, a) pentru o platbandă și cu *1'...10'* pentru cealaltă platbandă (fig. 2.22, b).

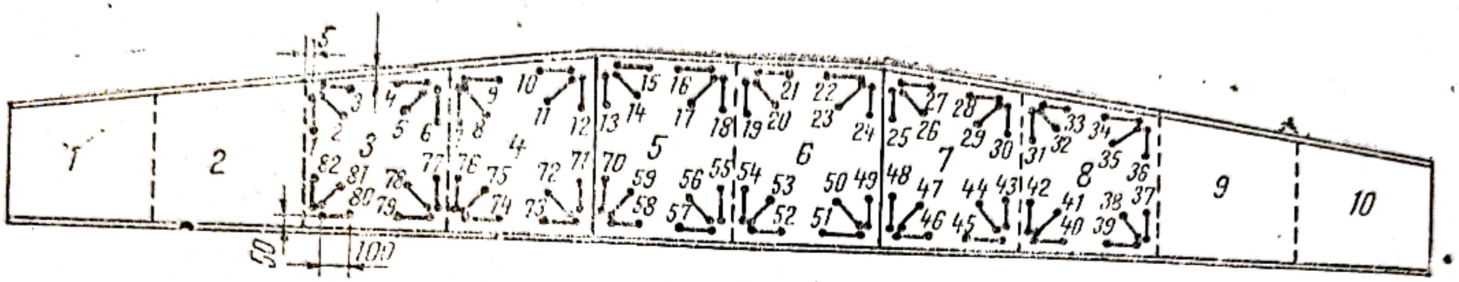
Talpa superioară a traversei a fost împărțită tot în zece zone notate cu *I...X* pentru partea corespunzătoare platbandei avînd sectoarele notate cu *1...10* și, respectiv, cu *I'...X'* pentru partea tălpii corespunzătoare platbandei avînd sectoarele notate cu *1'...10'* (fig. 2.22c).

În fig. 2.22 este indicată și poziția rozetelor dreptunghiulare amplasate în sectoarele *3...8* și *3'...8'*.

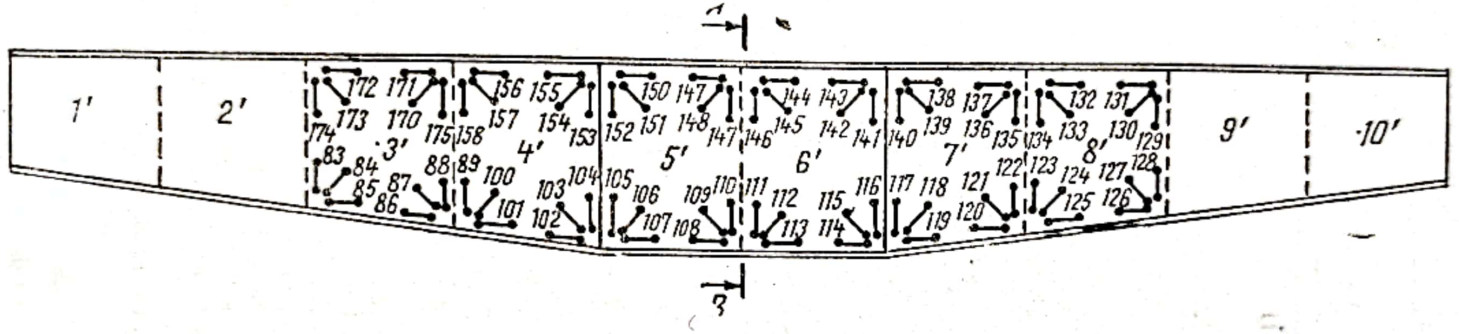
Pe fața exterioară a tălpii superioare deformațiile au fost măsurate numai după direcția longitudinală a traversei.

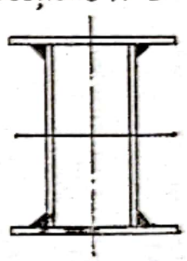
---

*) Măsurările tensometrice au fost efectuate de către un colectiv de la „Electroputere"-Craiova, sub conducerea ing. M. Băltănoiu.

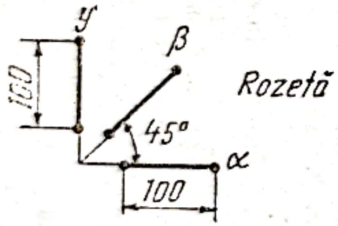

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
50
100

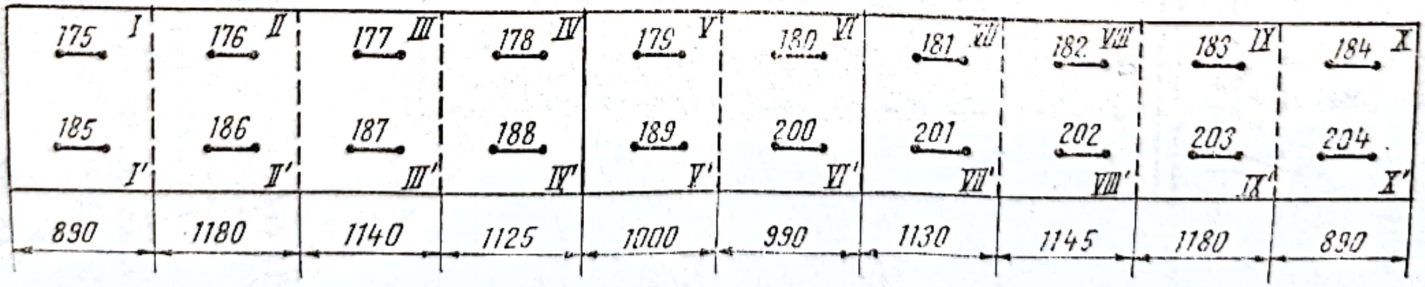
a


1'
2'
3'
4'
5'
6'
7'
8'
9'
10'


Secțiune A-B

b


y
β
Rozetă
45°
α
100
100


175 I
176 II
177 III
178 IV
179 V
180 VI
181 VII
182 VIII
183 IX
184 X
185 I'
186 II'
187 III'
188 IV'
189 V'
200 VI'
201 VII'
202 VIII'
203 IX'
204 X'
890
1180
1140
1125
1000
990
1130
1145
1180
890

c

Fig. 2.22.

Măsurările au fost efectuate după ce, în prealabil, s-a făcut etalonarea extensometrului, cu ajutorul etalonului de invar, care se găsea în aceleaşi condiţii atmosferice cu traversa în momentul cînd s-au efectuat măsurările.

De menţionat că bilele au fost fixate pe elementele traversei (în poziţiile stabilite în prealabil, cu ajutorul dispozitivului livrat împreună cu extronsometru), înainte de efectuarea îmbinării prin sudare.

În primul rînd s-au determinat valorile iniţiale reale ale bazei de măsurare pentru fiecare segment. Apoi s-au măsurat valorile bazei de măsurare în următoarele situaţii:

a) după sudarea completă a traversei;

b) după încărcarea şi descărcarea traversei;

Încărcarea traversei s-a făcut cu o locomotivă Diesel electrică de 2100 CP.

Cunoscînd valorile iniţiale ale bazei de măsurare l_0 şi valorile acesteia după deformare au fost determinate deformaţiile specifice pentru:

— segmentele orizontale (direcţia α);

— segmentele înclinate la 45° faţă de orizontală (direcţia β) şi

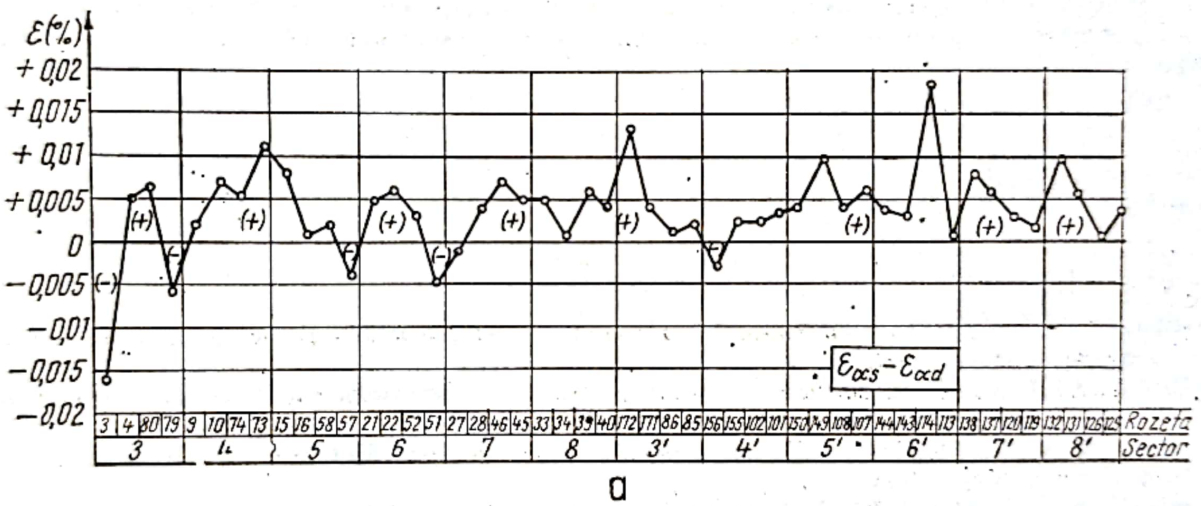
— segmentele verticale (direcţia γ).

Cu rezultatele obţinute la măsurările efectuate în cele două situaţii, s-au întocmit graficele care exprimă diferenţa dintre deformaţiile specifice după sudarea traversei (ε_s) şi valorile acestora după operaţia de încărcare-descărcare (ε_d).

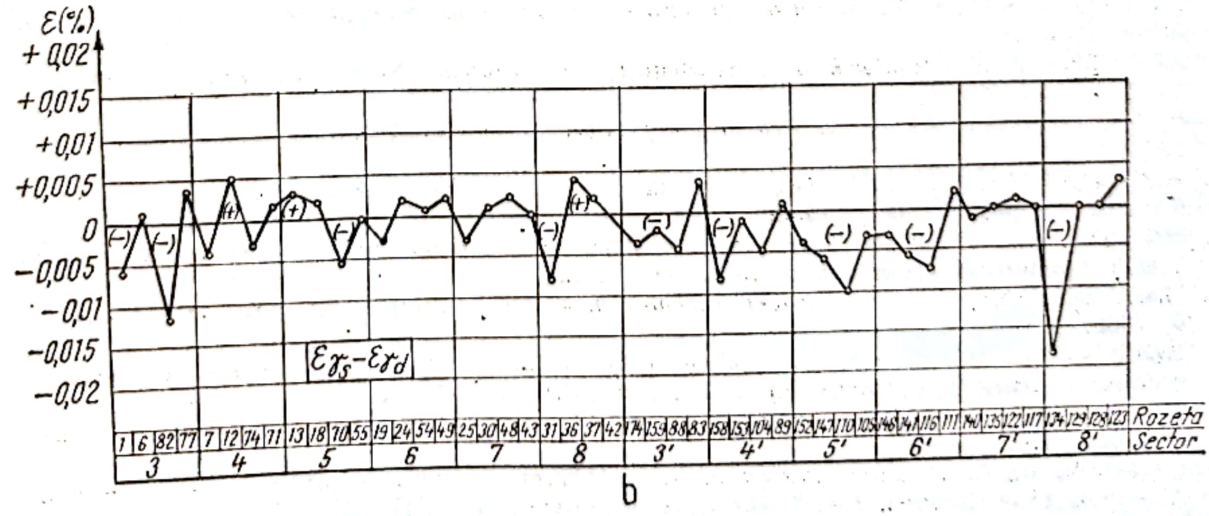
În fig. 2.23 se prezintă graficele pentru:

— segmentele orizontale (fig. 2.23, a),

— segmentele verticale (fig. 2.23, b).



a



b

Fig. 2.23.

7 c. — 359

În fig. 2.24 se prezintă valoarea deformaţiilor specifice, după sudare şi a deformaţiilor specifice după încărcare-descărcare în sectoarele 3 şi 3'.

Se observă că deformaţiile specifice rezultate au valori inferioare celei corespunzătoare limitei de elasticitate.

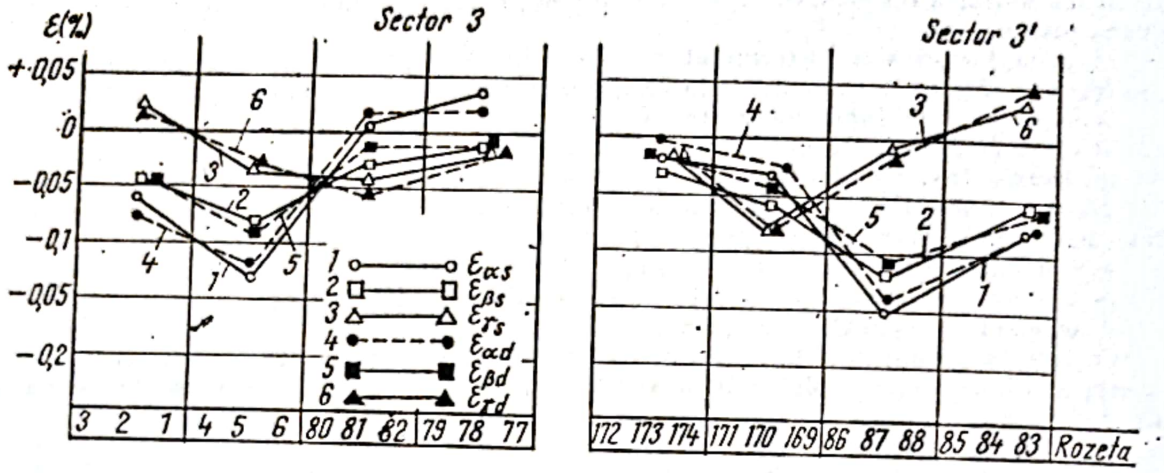


Fig. 2.24.

Tensiunile principale care au fost calculate în funcţie de ε_d, ε_β, ε_γ cu relaţiile corespunzătoare acestui tip de rozetă (tab. 1.5 poz. 1) sînt, deasemenea, inferioare limitei de elasticitate.

BIBLIOGRAFIE

1. BAKER, H. W., *Étude concernant la precision des comparateurs a cadran neuf des usagés*, Micrometric nr. 3, 1956.
2. BONRALET, C., *Extensométrie mécanique. Journée d'Extensométrie*, Laboratoire National d'Essais, Paris, 1967.
3. DALLY, W. J., RILEY, F. W., *Experimental stress analysis*, McGraw-Hill Book Company-New York-Sidney, 1966.
4. FINK, K., ROHRBACH, C., Handbuch der Dehnungs und Spannungsmessungen, Düsseldorf V.D.I. Verlag, 1959.
5. HERMITE, ROBERT, *Méthodes générales d'éssai et de controle en laboratoire*, Eyrolles, Paris, 1959.
6. HETTENYI, M., *Handbook of experimental stress analysis*, New-York, John Wiley et Sons, 1950.
7. HOLY, ST., SPANILY, O., *Pruznost a pevnost III. Experimental pruznost*, Ceské vysoké, 1973.
8. JACUBOWITZ, G., BELLIER, J., *Mésure des effets dynamiques a l'aide des cordes vibrantes*, RILEM symposium, oct., 1955.
9. MAIHAC, H., SPERLING, H., *Erfahrungen mit Seitendehnungs messern im Wagenbau*, V.D.I. Spanungsanalyse, Dusseldorf, oct. 1952.
10. MALASCKENKO, S. W., *Pneumatische tensometer*, Bauplanung und Bautechnik, nr. 6, 1953.
11. MOCANU, D. R., BUGA, M., GEORGESCU, C., *Determinarea experimentală a eforturilor unitare*, Editura Transporturilor şi Telecomunicaţiilor, 1966.
12. MOLLE, R., *Les récentes tendances de la metrologie pneumatique*, Microtechnik (Suisse), vol. X, 1956.
13. PETRIK, M., *Contribution aux questions de la théorie et construction des extensometres pneumatiques*, IX-e Congres. Int. Mecaniquée appliquée, tom VII, Bruxelles, 1957.
14. SIEBEL, E., *Handbuch der Werkstoffprüfung*, Vol. I şi II, Springer Verlag, 1958.

Scanned with OKEN Scanner

3

TENSOMETRIA ELECTRICĂ

Prof. dr. ing. M. BUGA
Dr. ing. C. BURADA
Dr. ing. I. CONSTANTINESCU
Prof. dr. doc. D. R. MOCANU
M. TEODORU

3.1. GENERALITĂȚI

Tensometria electrică este metoda de măsurare a deformațiilor și a alungirilor unui corp solicitat, prin intermediul unor *traductoare* care transformă variațiile deformațiilor mecanice în variații ale unei mărimi electrice.

Ca metodă, tensometria electrică face parte din metodele generale de măsurare pe cale electrică a mărimilor neelectrice.

Tensometria electrică ale cărei baze au fost puse în urmă cu aproximativ patru decenii, a cunoscut o rapidă și largă dezvoltare datorită importantelor avantaje pe care le prezintă : metoda este nedistructivă, deci nu sînt modificate forma și dimensiunile piesei sau structurii care este măsurată ; permite executarea de măsurări în condiții reale de funcționare a acestora ; asigură, prin folosirea aparatajului electronic, o sensibilitate și o precizie mult mai mare decît metodele mecanice, optice, acustice sau pneumatice ; de asemenea, utilizarea aparatajului electronic, care practic este lipsit de inerție, permite măsurarea și înregistrarea fenomenelor a căror variație este rapidă.

Traductoarele utilizate în tensometrie pot fi clasificate în funcție de mărimea electrică în care este tradusă mărimea mecanică (traductoare rezistive, capacitive, inductive) sau în funcție de mărimea mecanică măsurată (traductoare de deplasare, de deformație specifică, de viteză, de accelerație). Aceste criterii de clasificare nu se exclud între ele ; astfel, pentru măsurarea unei deformații pot fi folosite atît traductoare inductive, cît și capacitive iar cu un traductor inductiv se pot măsura fie deplasări, fie accelerații.

3.2. TRADUCTOARELE ELECTROTENSOMETRICE

3.2.1. TRADUCTORUL REZISTIV

Traductorul rezistiv folosit în tensometrie este un rezistor constituit din unul sau mai mulți conductori — în majoritatea cazurilor metalici — legați în serie, de diametru foarte mic (0,015 ... 0,02 mm), avînd

o rezistenţă electrică ale cărei valori sînt, de regulă, cuprinse între :

$$R = 50 \text{ ohmi şi } R = 1000 \text{ ohmi.}$$

Acest rezistor este lipit pe un suport sau înglobat în suport (de hîrtie sau din material sintetic). Datorită formei şi dimensiunilor sale reduse (fig. 3.1.) traductorul rezistiv este numit şi marcă tensometrică sau timbru tensometric.

În această lucrare se foloseşte denumirea de *traductor electrotensometric rezistiv* (prescurtat TER).

Aceste traductoare au cea mai largă utilizare în tensometrie datorită simplităţii lor şi a uşurinţei de aplicare pe piesa de măsurat, respectiv

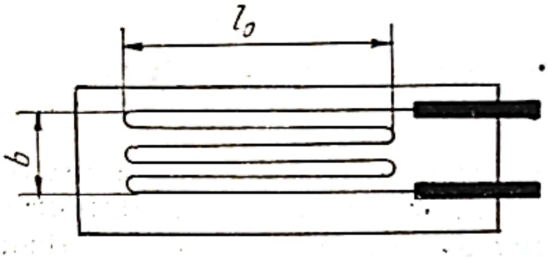


Fig. 3.1.

costului redus al lucrărilor, precum şi datorită preciziei şi marilor posibilităţi pe care le oferă în realizarea de măsurări în cele mai complicate şi dificile condiţii de lucru şi de încărcare.

Principiul de funcţionare al traductorului rezistiv. Traductorul, lipit pe piesa supusă cercetării astfel încît să urmărească fidel deformaţiile acesteia, suferă, prin deformare, o variaţie a rezistenţei sale electrice. S-a constatat că variaţia specifică a rezistenţei trductorului este, între anumite limite, practic proporţională cu deformaţia specifică suferită de acesta odată cu piesa pe care este aplicat.

Acest fenomen de variaţie a rezistenţei electrice a unui conductor prin deformaţia sa mecanică (denumit fenomen de tensoefect) stă la baza utilizării TER.

Se ştie că rezistenţa electrîcă R a unui fir de secţiune constantă este

$$R = \rho \frac{l}{s} \tag{3.1}$$

în care ρ este rezistivitatea materialului firului, în $\Omega \cdot m$; l lungimea firului, m ; s secţiunea firului, m^2.

Logaritmînd şi diferenţiind, rezultă relaţia

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s}$$

care, pentru o variaţie finită a mărimilor, devine

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s}. \tag{3.2}$$

Scanned with OKEN Scanner

În această relaţie, $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$ iar $\frac{\Delta s}{s} = -2\mu\varepsilon$, unde μ este coeficientul lui Poisson.

Pentru evaluarea termenului $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ se aplică, în mod curent, aşa numita lege a lui Bridgman [18]

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = c\frac{\Delta V}{V} \tag{3.3}$$

în care c este o constantă a materialului (denumită constanta lui Bridgman) a cărei valoare este determinată experimental, prin încercări de întindere a firelor; V volumul firului ($V = l \cdot s$)

Ţinînd seama că $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta s}{s} = (1 - 2\mu)\frac{\Delta l}{l}$, relaţia (3.3) devine

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = c\,(1 - 2\mu)\frac{\Delta l}{l}; \tag{3.3'}$$

Relaţia (3.3') este aproximativă, deoarece ρ nu depinde numai de volum, ci şi de orientarea cristalelor materialului; de fapt valoarea lui c diferă după direcţiile de cristalizare.

Un raţionament mai riguros are la bază legea lui Ohm aplicată unui cristal cubic supus unei solicitări, cu deformaţii mici şi care se exprimă prin formula [18]

$$E_i = \rho_{ij} J_j (\delta_{ij} + \pi_{ijkl}\, T_{kl}) \tag{3.4}$$

în care E_i este cîmpul electric, J_j densitatea de curent, ρ_{ij} rezistivitatea, δ_{ij} un tensor metric fundamental (simbolul lui Kronecker), π_{ijkl} un tensor de ordinul patru, numit tensorul coeficienţilor de piezorezistivitate, T_{kl} tensorul tensiunilor.

Variaţia rezistivităţii pe direcţia j este

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_j = \sum_k \pi_{jk}\, T_k.$$

În cazul unui fir, solicitarea fiind monoaxială, se obţine

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi T = \pi\sigma = \pi E\frac{\Delta l}{l} \tag{3.5}$$

unde π este coeficientul de piezorezistivitate, E modulul de elasticitate.

Comparînd relaţia (3.5) cu (3.3'), rezultă că

$$c\,(1 - 2\mu) = \pi E. \tag{3.6}$$

Scanned with OKEN Scanner

Prin urmare, relaţia (3.2) poate fi scrisă sub forma

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \pi E)\frac{\Delta l}{l}. \tag{3.7}$$

Raportul dintre variaţia specifică a rezistenţei şi deformaţia specifică ε se notează obişnuit cu k şi este denumit *coeficientul de tensosensibilitate* al firului şi are valoarea

$$k = \frac{\Delta R}{R}\cdot\frac{1}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \pi E. \tag{3.8}$$

Acest coeficient depinde, în principal, de material. Pentru anumite aliaje, ca de exemplu constantan sau nichel-crom, la care $\mu = 0{,}3$ şi $\pi E \approx$ $\approx 0{,}4$ (ceea ce conduce, conform relaţiei (3.6) la valoarea $c = 1$, pentru constanta lui Bridgman) se obţine $k = 2$, valoare rezultată şi din determinările experimentale.

Coeficientul de tensosensibilitate depinde şi de modul de prelucrare a firului, de tratamentul termic şi mecanic, precum şi de diametrul firului (el scade odată cu creşterea diametrului).

De asemenea, valoarea coeficientului se modifică în cazul cînd firul este aplicat pe un suport, pentru a forma reţeaua unui traductor, şi este influenţată de dimensiunile traductorului. De aceea, valoarea acestui coeficient se determină experimentul pentru fiecare lot de traductoare în parte. În acest caz, coeficientul k definit prin relaţia

$$k = \frac{1}{\varepsilon}\frac{\Delta R}{R} \tag{3.9}$$

este denumit constanta traductorului.

Din tabelul 3.1, în care sînt date proprietăţile unor materiale utilizate la confecţionarea TER se poate vedea că valorile coeficientului de tensosensibilitate variază în limite largi : de la +3,5 pentru izoelastic, la −12,1 pentru nichel.

Tabelul 3.1

Caracteristicile materialelor folosite la confecţionarea traductoarelor tensometrice rezistive

Materialul	Compoziţia %	Coeficientul de tensosensibilitate k	Rezistenţa specifică $\Omega \cdot mm^2/m$	Coeficientul de variaţie a rezistenţei cu temperatura $\Omega/°C$	Tensiunea termoelectrică în raport cu cuprul μ V/°C
Constantan	60 Cu, 40 Ni	2,0 ... 2,1	0,45 .. 0,51	10×10^{-6}	43
Advans Copel	55 Cu, 45 Ni	2,1 ... 2,4	0,476	10×10^{-6}	43
Crom-Nichel	80 Ni, 20 Cr	2,1 ... 2,3	1,0 .. 1,1	15×10^{-6}	22
Izoelastic	36 Ni, 8 Cr 52 Fe, 0,5 Mo 3,5 Mn, Si, Cu, V	2,8 ... 3,5	1,11	175×10^{-6}	3,0
Nichel	100 Ni	−12,1	0,115	—	—

Scanned with OKEN Scanner

Materialele utilizate pentru confecționarea traductoarelor tensometrice trebuie să aibă:

— relație liniară între variația rezistenței și a deformației mecanice, într-un domeniu cît mai mare;

— coeficient de tensosensibilitate cît mai ridicat;

— histerezis nul;

— rezistență specifică mare;

— coeficient de variație a rezistenței cu temperatura cît mai mic;

— coeficient de dilatare liniară cît mai aproape de cel al materialului din care este confecționată piesa sau structura supusă cercetării;

— ușurință la prelucrare și la executarea legăturilor electrice;

— limită de elasticitate cît mai ridicată.

Nici un material nu corespunde integral acestor condiții. Fiecare material, în anumite domenii, mai mici sau mai mari, ale deformației specifice, prezintă o legătură liniară între aceasta și variația rezistenței (coeficient k constant).

Nichelul are un coeficient de tensosensibilitate ridicat, dar prezintă histerezis în modificarea rezistenței funcție de deformații; aliajul crom-nichel are un coeficient de variație a rezistenței cu temperatura relativ ridicat.

Constantanul este unul din materialele care îndeplinește majoritatea condițiilor enumerate mai sus și de aceea este folosit frecvent la confecționarea TER, deși are un coeficient de tensosensibilitate de valoare mai mică decît altele. Prin tratament termic de recoacere (încălzire în vid la circa 650°C timp de trei ore și răcire înceată în cuptor) se poate obține o mărire a coeficientului de tensosensibilitate și a domeniului de liniaritate.

În fig. 3.2 sînt date curbele de variație a raportului $\frac{\Delta R}{R}$ în funcție de alungirea specifică ε pentru sîrma de constantan netratată (fig. 3.2, a)

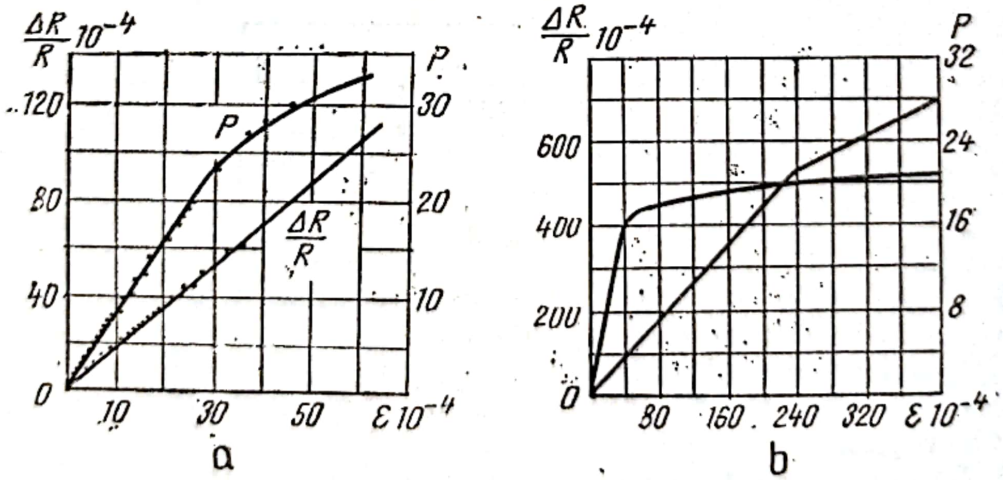


Fig. 3.2.

și cea tratată termic (fig. 3.2, b); în fig. 3.2 sînt date și curbele de variație ale deformației specifice ε în funcție de încărcarea P, în daN.

Se vede din această figură că, pentru sîrma de constantan nerecopt, coeficientul de tensosensibilitate rămîne constant ($k = 1{,}7$) pînă la ruperea sîrmei, care are loc la $\varepsilon \approx 0{,}65\%$, corespunzător unei sarcini P de circa 320 N, pe cînd la sîrma tratată termic sarcina necesară pentru producerea aceleiaşi deformaţii este mult mai mică (circa 60% din valoarea de mai sus), deformaţia pînă la rupere este mult mai mare, iar coeficientul de tensosensibilitate este $k = 2{,}2$ în cazul $\varepsilon \leqslant 2{,}4\%$ şi $k = 1$ pentru $\varepsilon = 2{,}4 \ldots 4\%$.

Tipuri de traductoare rezistive. Pentru utilizarea în diferite condiţii au fost create numeroase tipuri de TER, care diferă atît prin materialul rezistorului, cît şi al suportului şi adezivului.

Astfel, pentru condiţii normale de lucru, ca temperatură şi umiditate, se utilizează traductoarele tensometrice din sîrmă sau folie de constantan, advans sau izoelastic, pe suport de hîrtie sau material sintetic.

Forma şi dimensiunile acestor traductoare sînt din cele mai diferite; se confecţionează traductoare simple, pentru măsurări pe o singură direcţie şi traductoare sub formă de rozete, pentru măsurări pe două, trei sau chiar patru direcţii.

În tabelul 3.2 sînt prezentate o serie de tipuri de TER, indicîndu-se principalele lor caracteristici şi domeniul de utilizare.

Caracteristicile traductoarelor rezistive. Principalele caracteristici ale traductoarelor tensometrice rezistive sînt:

a) *Tipul reţelei*: fir sau folie.

b) *Dimensiunile reţelei*, indicate pentru traductorul din fir în figura 3.1 şi pentru traductorul din folie metalică în figura 3.3; interesează în special lungimea activă l_0 care reprezintă *baza de măsurare a traductorului*. Se confecţionează TER cu $l_0 = 0{,}2 \ldots 200$ mm, frecvent utilizîndu-se traductoare cu $l_0 = 10$ mm.

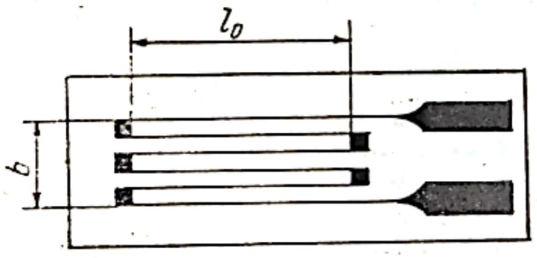


Fig. 3.3.

c) *Materialul suportului*: hîrtie, răşină epoxidică, acrilică, fenolică etc. De natura acestui material depinde tipul de adeziv care se poate utiliza la aplicarea traductorului pe piesă.

d) *Dimensiunile suportului*: sînt de obicei de 1,5...2 ori mai mari decît ale reţelei.

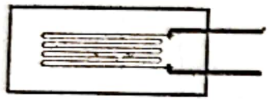
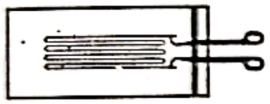
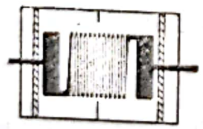
e) *Rezistenţa electrică a traductorului*, care este cuprinsă, pentru diverse tipuri de traductoare, între 50 şi 1000 ohmi; valorile uzuale sînt: 120, 300 şi 600 ohmi.

f) *Constanta k a traductorului*, care, funcţie de tipul traductorului, poate avea valori între 1,6 şi 3,6; uzual $k \approx 2{,}0$. Pentru traductoarele

Scanned with OKEN Scanner

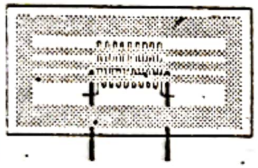
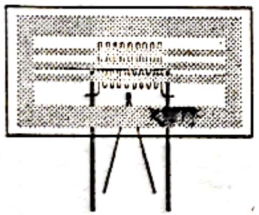
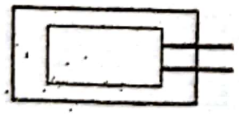
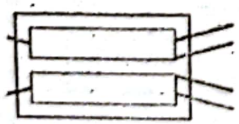
Tabelul 3.2.

Tipuri de traductoare tensometrice rezistive

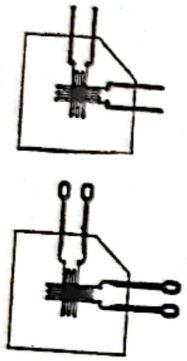
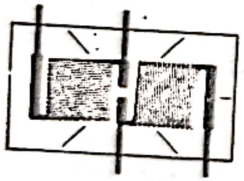
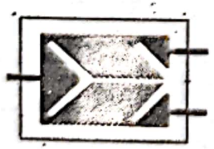
0	Nr. crt.	Schita traductorului	Felul rețelei	Materialul rețelei	Materialul suportului	Domeniul de temperatură	Utilizare
	1	2	3	4	5	6	7
Traductoare simple (pentru o singură direcție)	1		fir	constantan	rășină acrilică	−200°C ... + 80°C	pentru solicitări statice și dinamice
	2				rășină fenolică	−200°C ... +150°C	
	3		folie	constantan	rășină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice și dinamice; se fabrică și traductoare pentru deformații statice mari (0,1 m/m) însă în domeniul de −70°C ... +65°C.
					rășină fenolică	−200°C ... +175°C	pentru solicitări statice și dinamice
					rășină fenolică cu fibre de sticlă	−240°C ... +230°C	
	4		folie	constantan	rășină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice și dinamice
					rășină fenolică	−200°C ... +175°C	
					rășină fenolică cu fibră de sticlă	−240°C ... 230°C	

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.2 (continuare)

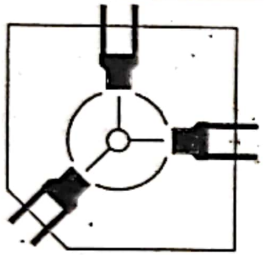
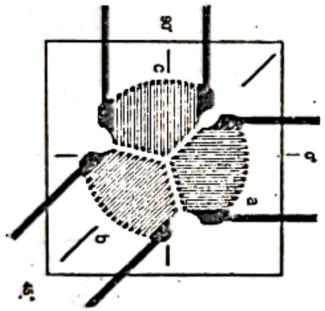
0	1	2	3	4	5	6	7
Traductoare simple (pentru o singură direcție)	5		folie	Nichrom V	rețea liberă	−270°C ... 316°C (stat) sau +600°C (din)	pentru încercări statice și dinamice
	6		fir	Nichrom V	rețea liberă	−270°C ... 315°C (stat) sau +950°C (din)	idem
				aliaj de platină	rețea liberă	−200°C ... +650°C (stat) sau +815°C (din)	
				constantan	rețea liberă	−200°C ... +230°C (stat) sau +315°C (din)	
	7		aceleași tipuri ca la poz. 6 traductorul conține și un termoelement				idem
	8		folie	constantan	oțel; traduct. fixat cu rășină fenolică	−200°C ... +260°	pentru solicitări statice; suportul de oțe se sudează pe piesa de încercat.
	9		folie; 4 traduct montate în punte	Nichrom V	oțel; traduct. fixate cu mat. ceramic	−270°C ... +450°C	idem

Scanned with OKEN Scanner

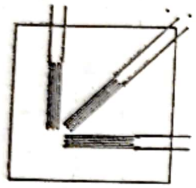
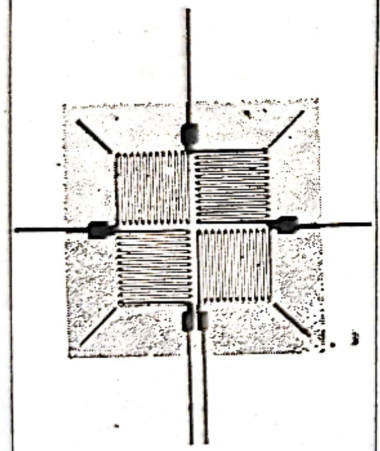
	10		fir	constantan	celuloză	−45°C ... +65°C	pentru deformaţii statice mari (0,1 m/m).
Rozete pe 2 direcţii	11 12		fir	constantan	răşină acrilică	−200°C ... +80°C	pentru solicitări statice şi dinamice; direcţiile: 0°/90° (reţele suprapuse)
	13		folie	constantan	răşină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice şi dinamice; direcţiile: 0°/90° (reţele alăturate)
					răşină epoxidică	−200°C ... + 175°C	
					răşină fenolică cu fibre de sticlă	−240°C ... +230°C	
	14		folie	constantan	răşină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice şi dinamice; direcţiile: −45°/+45° (reţele alăturate)
					răşini fenolică cu fibre de sticlă	−240°C ... +230°C	

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.2. (continuare)

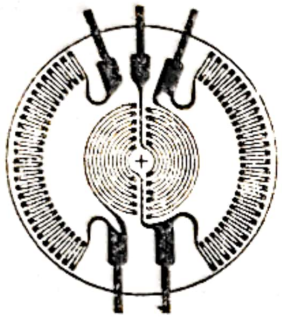
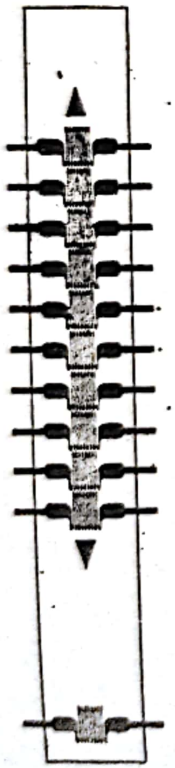
0	1	2	3	4	5	6	7
Rozete pe 3 direcții	15		folie	constantan	rășină fenolică cu fibre de sticlă	−240°C ... +230°C	pentru solicitări statice și dinamice; direcțiile: 0°/90° (rețele suprapuse)
	16		folie	constantan	rășină epoxidică	−200°C ... + 110°C	pentru măsurarea tensiunilor remanente; direcțiile: 0°/45°/90° (rețele alăturate și orificiul central,
	17		folie	constantan	rășină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice și dinamice; direcțiile: 0°/45°/90° (rețele alăturate)
					rășină fenolică	−200°C ... +175°C	
					rășină fenolică cu fibre de sticlă	−240°C ... +230°C	
	18		folie	constantan	rășină fenolică	−200°C ... +175°C	pentru solicitări statice și dinamice; pentru măsurarea eforturilor remanente în geologie; direcțiile: 0°/120°/240. (rețele alăturate și orificiu central),
	19		folie	constantan	rășină fenolică cu fibre de sticlă	−240°C ... +230°C	pentru solicitări statice și dinamice; direcțiile: 0°/45°/90° (rețele suprapuse).

Scanned with OKEN Scanner

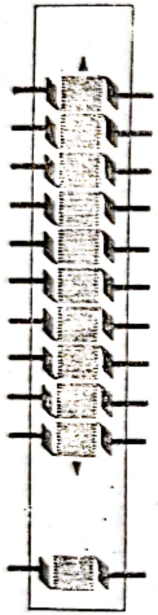
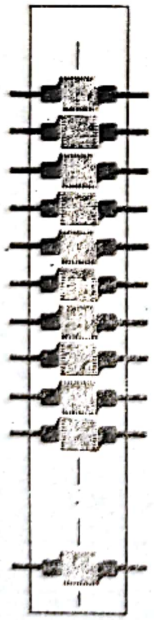
Traductoare cu destinație specială	20		fir	constantan	celuloză	−45°C ... +65°C	pentru deformații statice mari (80 mm/m); direcții: 0°/45°/90° (rețele alăturate)
	21		folie 4 trad. montate în punte	constantan	rășină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice și dinamice.
	22		folie în spirală	constantan	rășină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice și dinamice la membrane.

Scanned with OKEN Scanner

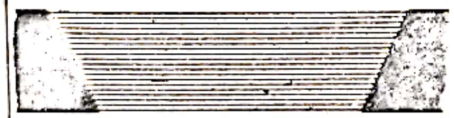
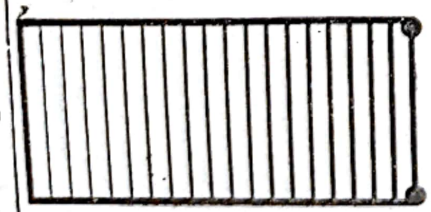
Tabelul 3.2. (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
Traductoare cu destinaţie specială	23		folii în spirală şi pe dir. razei	constantan	răşină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice şi dinamice; rozetă în punte pentru măsurări la membrane.
	24		folie; 10 + 1 trad. pe acela-laşi suport	constantan	răşină epoxidică	−200°C ... +110°C	pentru solicitări statice şi dinamice în zona concentrărilor de tensiuni; direcţiile reţeleler, paralele cu direcţia marcată.

Scanned with OKEN Scanner

Traductoare cu destinaţie specială	25		folie 10 + 1 trad. pe acelaşi suport	constantan	răşină epoxidică	− 200°C . . . + 110°C	idem ca la poz. 24 însă direcţiile sînt perpendicularepe direcţia marcată (90).
	26		folie; 5 rozete pe acelaşi suport	constantan	răşină epoxidică	−200°C . . . +110°C	idem ca la poz. 24 însă reţelele pe direcţiile : 0°/90°

Tabelul 3.2. (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
Traductoare cu destinaţie specială	27		folie ; 5 rozete pe acelaşi suport	constantan	răşină epoxidică	−200°C ...+110°C	idem ca la poz. 24 însă reţelele pe direcţiile : 0°/120°/240°
	28		folie	aliaj Karma	răşină epoxidică	−268°C ...+230°C	pentru studiul propagării fisurilor la solicitări de ± 2 mm/m (10^8 cicluri)
	29						

dintr-un acelaşi lot valoarea lui k nu trebuie să difere faţă de valoarea indicată cu mai mult de $\pm 1\%$.

g) *Domeniul de temperatură* în care se poate utiliza traductorul; acest domeniu depinde atît de adeziv şi de materialul suportului, cît şi de felul solicitării (constantă sau variabilă în timp).

Se indică de asemenea dacă traductoarele au coeficientul de temperatură adaptat materialului de încercat sau dacă sînt traductoare autocompensate.

Confecţionarea traductoarelor tensometrice rezistive. Tehnologia de fabricaţie a traductoarelor tensometrice diferă foarte mult în funcţie de tipul traductorului : felul reţelei (din fir sau din folie), felul suportului, al adezivului folosit la fixarea reţelei de suport, dimensiuni, etc.

Una din condiţiile cele mai importante şi mai greu de îndeplinit la un lot de TER confecţionate din fir rezistiv este asigurarea aceleiaşi valori a constantei k pentru întregul lot.

Pentru îndeplinirea acestei condiţii esenţiale, trebuie acordată o deosebită grijă, atît alegerii materialelor necesare şi pregătirii lor, cît şi operaţiilor efectuate în timpul confecţionării traductoarelor.

Calitatea traductoarelor tensometrice depinde într-o mare măsură de conştiinciozitatea şi îndemînarea celui ce le execută.

În prezent, în cîteva institute de cercetări şi întreprinderi de la noi din ţară se confecţionează traductoare tensometrice cu ajutorul unor dispozitive construite special în acest scop ; deşi nu există o tehnologie unică de confecţionare, totuşi aceste traductoare dau rezultate satisfăcătoare.

În figura 3.4 este prezentat, ca exemplu, dispozitivul construit şi folosit la Institutul de cercetări şi proiectări tehnologice din transporturi (ICPTT) din Bucureşti pentru confecţionarea traductoarelor cu fir rezistiv.

El se compune dintr-un bloc-suport *1*, pe care se fixează masa rotativă 2, cu ajutorul unui ax *3* şi al unui sistem de rezemare format din piesele *4*, *5* şi *6*. Într-o scobitură din masa rotativă poate culisa lama *7*, pe care se fixează hîrtia suport a reţelei tensosensibile ; hîrtia se prinde la un capăt al lamei cu ajutorul unei mici pene ce intră într-un şanţ practicat la capătul lamei pe grosimea ei, iar la celălalt capăt intră în şanţul unui ax care prin rotire cu şurubelniţa întinde hîrtia. Lama *7* se poate fixa pe masă cu ajutorul axului cu came *8* şi al unor lame de presare. Axul cu came intră într-un locaş special în corpul principal *9* a dispozitivului. Acesta susţine pe ghidajele sale capetele portlamele *10*, care se fixează pe ghidajele respective cu ajutorul plăcilor *11* şi al şuruburilor *12* ; aceste capete se pot fixa la distanţa dorită, permiţînd astfel confecţionarea unei reţele cu baza cuprinsă între 6 şi 40 mm. Pe capetele portlamele se fixează lamelele cu ciocuri *13* (din lamă de oţel arc de 0,3...0,4 mm grosime) şi şaibele de distanţare. Ciocurile acestor lamele pot sprijini pe hîrtia întinsă pe lama *7*, fixînd astfel buclele reţelei tensosensibile. Aducerea lamelelor în această poziţie de sprijin cu ciocurile pe hîrtie se face succesiv, prin intermediul unei piese *14*, special profilată, care se roteşte stînga-dreapta pe un ax montat în corpul principal.

Scanned with OKEN Scanner

Avansul necesar piesei profilate se obţine prin intermediul unui arc elicoidal.

Firul rezistiv se fixează pe masă cu ajutorul unui ştift şi al unui arc (piesele *15*, *16*); în poziţia extremă, firul este oprit de un al doilea ştift *17*.

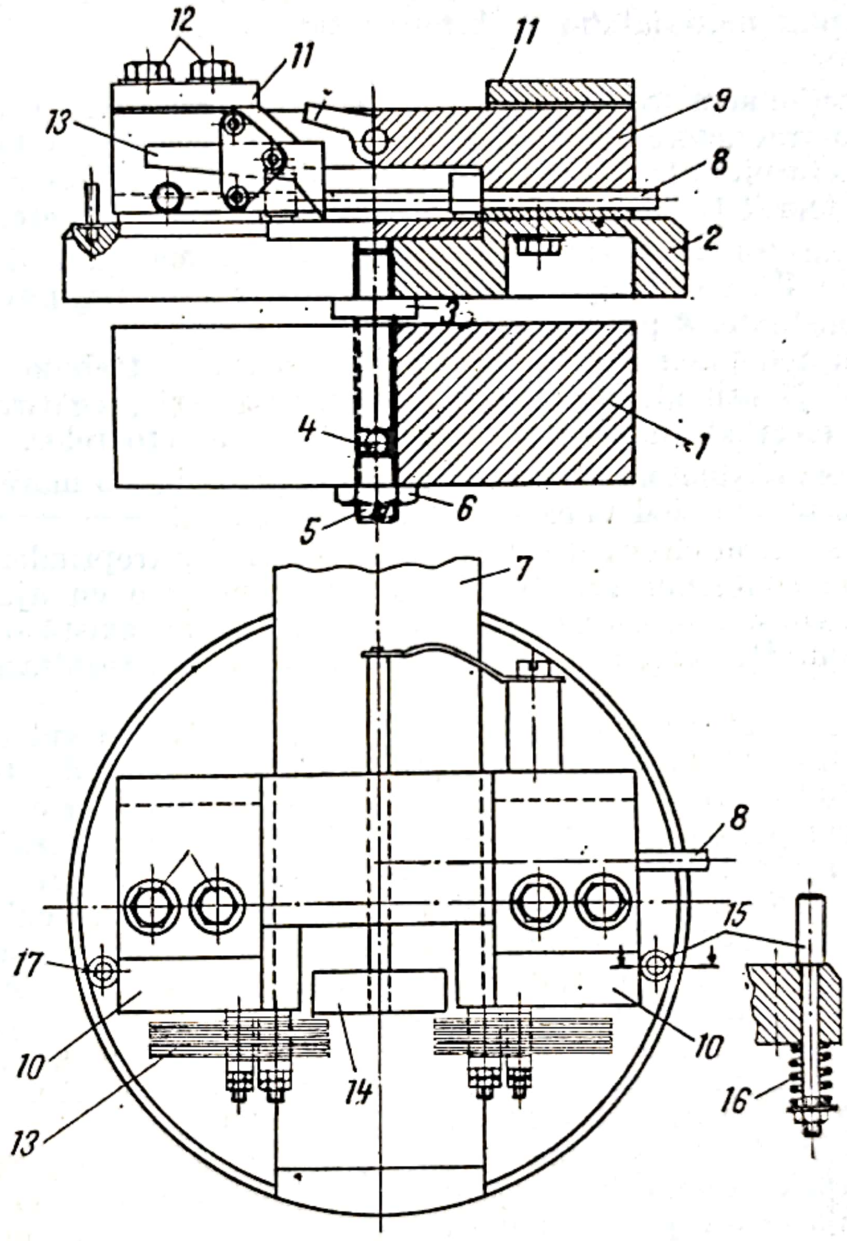


Fig. 3.4.

Prin rotaţii alternative de aproximativ 200° într-un sens şi altul şi coborîrea pe rînd a ciocurilor lamelelor se realizează reţeaua.

Modul de confecţionare a TER cu acest dispozitiv este descris în lucrările [19], [20].

Scanned with OKEN Scanner

3.2.2. TRADUCTORUL TENSOMETRIC CU SEMICONDUCTOARE

Din categoria traductoarelor rezistive, în afara celor metalice prezentate la §3.2.1, fac parte și cele cu semiconductoare.

Traductoarele cu semiconductoare au apărut în 1954 ca urmare a cercetărilor efectuate de Smith și Herring asupra piezorezistenței siliciului și germaniului. Piezorezistența este proprietatea pe care o au materialele de a-și schimba conductivitatea electrică în urma unei solicitări mecanice; această proprietate se manifestă în mai mare măsură la unele semiconductoare printre care germaniul și siliciul, folosite la realizarea traductoarelor de deformații.

Principiul de funcționare. Principiul de funcționare al traductoarelor cu semiconductoare este același ca al TER cu fir metalic: variația rezistenței electrice ca urmare a solicitării mecanice.

Spre deosebire însă de TER metalice la care variația rezistivității, exprimată prin termenul πE, este mică în raport cu variația de volum, la semiconductoare coeficientul de piezorezistivitate este de cca. 100 de ori mai mare decît ceilalți termeni, astfel că valoarea coeficientului k este cuprinsă între 50 și 200, această valoare depinzînd de procentul de impurități, de direcțiile cristaline și de rezistivitate.

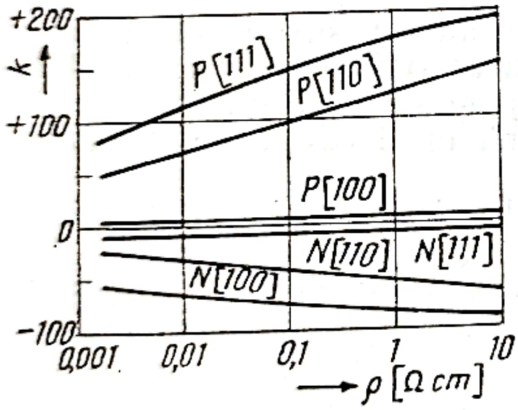


Fig. 3.5.

În figura 3.5 se arată variația coeficientului de tensosensibilitate k la siliciu în funcție de rezistența specifică și direcțiile cristaline.

Fenomenul de variație a rezistivității este destul de complex și poate fi rezumat astfel [17]:

Siliciul cristalizează într-un sistem cubic cu fețe centrate, ca acela al diamantului. În această stare, el este izotrop. Cînd este supus unei solicitări mecanice, izotropia dispare și conductivitatea sa crește sau scade după anumite direcții cristaline. Se alege direcția după care această variație este cea mai mare și se măsoară rezistența cristalului pe această direcție. Direcțiile privilegiate sînt direcțiile [111] pentru siliciul tip p și [100] pentru siliciul tip n. Ele se pot determina analitic folosind ecuația (3.4). Coeficientul k este pozitiv pentru tipul p și negativ pentru tipul n.

Valorile acestui coeficient pentru o serie de semiconductoare sînt prezentate în tabelul 3.3 [25].

Cele mai utilizate materiale pentru realizarea traductoarelor cu semiconductoare sînt siliciul și germaniul.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.3.

Principalele caracteristici ale semiconductoarelor uzuale

Materialul	Tipul	Rezistența specifică		Modulul E	πE	Direcțiile cristaline
		$\Omega \cdot cm$	la temperatura în °K	$\frac{kN}{mm^2} \times 10^3$		
Si	*p*	7,8	300	1,87	175	[111]
Si	*n*	11,7	300	—	−133	[100]
Ge	*p*	15	300	1,55	102	[111]
Ge	*n*	16,6	300	—	−157	[111]
InSb	*p*	0,54	77	—	− 45	[100]
InSb	*p*	0,01	77	0,745	30	[111]
InSb	*n*	0,013	77	—	− 74,5	[100]
TiO_2	*n*	0,2	300	1,5	15	[100]
TiO_2	*n*	50	300	3,6	28	[001]

Coeficientul k fiind funcție de rezistivitate, variația rezistenței nu mai este liniară, deci nu mai corespunde relației (3.7); se consideră în general, relația

$$\frac{\Delta R}{R} = k\frac{\Delta l}{l} + \beta\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2. \qquad (3.10)$$

În figura 3.6 se dă curba obținută conform relației (3.10) pentru siliciul tip *p*. Curbura relativ importantă a acestei curbe restrînge domeniul în care variația poate fi considerată practic liniară și alterează simetria față de punctul zero, ceea ce constituie un dezavantaj al traductoarelor cu semiconductoare.

Pe măsură ce rezistivitatea scade, curba din figura 3.6 se apropie din ce în ce mai mult de o dreaptă.

Un alt dezavantaj al traductoarelor cu semiconductoare îl reprezintă variația puternică cu temperatura a rezistenței specifice, din care cauză

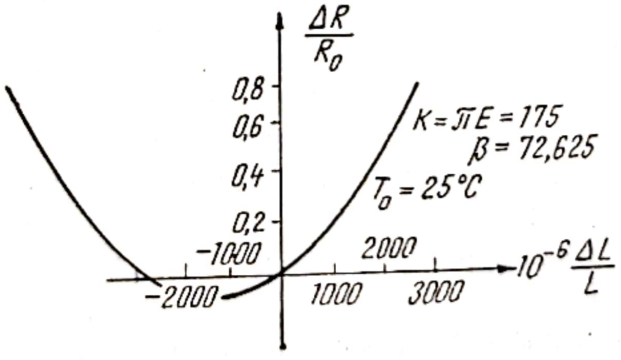


Fig. 3.6.

nu sînt utilizate în cazurile în care temperatura variază în limite largi în timpul măsurării.

Tipuri constructive de traductoare cu semiconductoare. Traductoarele cu semiconductoare se prezintă sub forma unor bastonașe paralelipi-

pedice de dimensiuni foarte mici, avînd aproximativ 2...7 mm lungime, 0,1...0,5 mm lăţime şi 10...50 microni grosime. Contactul electric este asigurat prin două fire de diametru foarte mic, aproximativ 50 microni, legate la capetele semiconductorului prin presare la cald. Bastonaşele sînt obţinute printr-o succesiune de tratări mecanice şi chimice ale unui monocristal de siliciu, în prealabil tratat cu impurităţi şi orientat.

Un asemenea traductor poate fi liber sau înglobat într-un suport de răşină epoxidică foarte subţire, care îi asigură o mai mică fragilitate.

În figura 3.7 sînt prezentate trei tipuri constructive de traductoare cu semiconductoare: *a* reprezintă un traductor cu un monocristal, *b*, un traductor dublu, cu un cristal *p* şi altul *n*, legate în semi-punte, iar *c*, un monocristal în formă de U.

Traductorul din figura 3.7, b are constanta $k = k_p + k_n$ şi prezintă avantajul că asigură o bună compensare a efectului variaţiei de tempera-

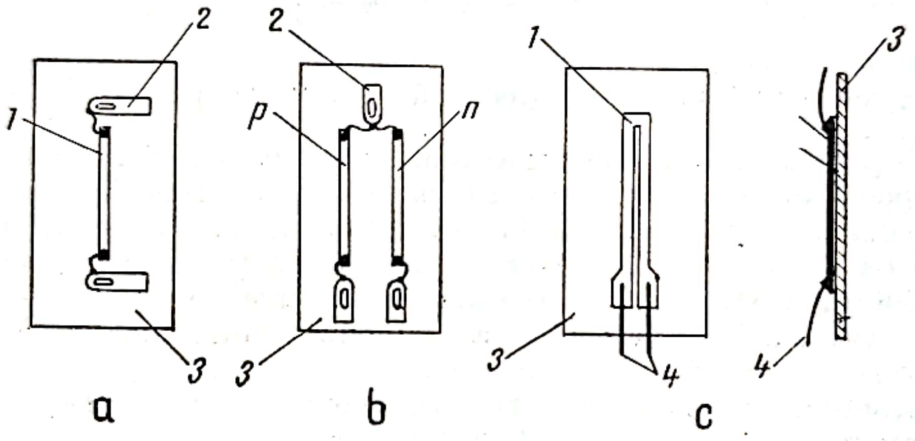


Fig. 3.7.

tură, în domeniul temperaturilor ambiante. Notaţiile din figură reprezintă: *1* — cristale; *2* — folii pentru contact; 3 — suport; *4* — conductoare de conexiune.

Traductorul cu semiconductoare, în special cele cu suport din material sintetic, se aplică pe piesă cu aceiaşi adezivi şi în acelaşi fel ca TER metalic. Trebuie menţionat totuşi că în urma lipirii traductorul suferă o contracţie care modifică starea iniţială de referinţă pentru determinarea deformaţiilor specifice, modificîndu-se astfel valoarea efectivă a constantei traductorului. De aceea, pentru traductoarele semiconductoare, se indică:

- rezistenţa nominală: R_0 la 20°C
- constanta nominală: k, la 20°C
- factorul de neliniaritate: β, la 20°C
- curba de variaţie: $R_0 = f(t)$ pentru traductorul nelipit şi nesolicitat ($\varepsilon = 0$)
- curba de variaţie $R_m = f(t)$ pentru traductorul montat pe piesă nesolicitată.

Scanned with OKEN Scanner

Avînd în vedere sensibilitatea mare a traductoarelor semiconductoare, folosirea lor este indicată în special atunci cînd este necesar :

— să se măsoare alungiri foarte mici, ($\varepsilon < 10^{-8}$);

— să se măsoare deformaţii cu aparatura cît mai simplă (fără amplificare).

3.2.3. TRADUCTORUL CAPACITIV

Principiul de funcţionare. Traductorul capacitiv transformă variaţia de lungime în variaţie de capacitate electrică. El este de fapt un condensator alcătuit din două plăci conductoare de suprafaţă S, situate la o distanţă d şi între care se află un material a cărui constantă dielectrică este ε; capacitatea acestui condensator este dată de relaţia

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \varepsilon_0 \, \varepsilon_r \frac{S}{d} \tag{3.11}$$

în care ε_0 este permitivitatea electrică a vidului $\left[\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}\right]$;

ε_r — permitivitatea electrică relativă a materialului dintre plăci.

Se poate produce o variaţie a capacităţii, prin modificarea uneia din cele trei mărimi din formula (3.11), ca urmare a unei solicitări mecanice, obţinîndu-se astfel un traductor capacitiv. Ca realizare constructivă şi mod de lucru, aceste traductoare diferă mult între ele în funcţie de mărimea care variază (ε, d sau S), însă toate sînt traductoare pasive, necesitînd o sursă electrică de alimentare.

Traductoarele capacitive prezintă următoarele avantaje : sensibilitate extrem de mare, posibilităţi largi de adaptare şi de utilizare în cele mai diverse condiţii, chiar în cazul măsurărilor la temperaturi înalte şi de fenomene cu variaţie rapidă. Principalul dezavantaj constă în rezistenţa lor proprie mare, din care cauză aceste traductoare se pot conecta numai la aparate cu rezistenţa mare de intrare, ceea ce face să crească influenţa cîmpurilor electrice perturbatoare asupra rezultatelor măsurărilor; aceste rezultate sînt mult influenţate şi de prezenţa accidentală a lichidelor cu $\varepsilon > 1$, dintre care uleiul şi în special apa (cu $\varepsilon \approx 80$) sînt cele mai greu de evitat. Mai trebuie menţionat că în circuitul traductorului capacitiv mai intervin, pe lîngă capacitate, elemente inductive şi rezistive care influenţează atît sensibilitatea traductorului, cît şi rezultatele măsurărilor; de aceea este necesar ca între aceste mărimi să se realizeze un anumit raport [25].

Tipuri de traductoare capacitive. Principalele tipuri de traductoare capacitive folosite în tensometrie sînt :

a) *Traductorul cu distanţa dintre plăci variabilă.* Prin modificarea distanţei dintre plăci se modifică valoarea capacităţii traductorului conform relaţiei de mai jos, obţinută prin derivarea relaţiei (3.11)

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\varepsilon_0 \, \varepsilon_r \frac{S}{d^2}. \tag{3.12}$$

Scanned with OKEN Scanner

Din această relaţie se vede că sensibilitatea traductorului este cu atît mai mare cu cît distanţa iniţială d dintre plăci este mai mică şi că c nu variază liniar cu d.

Exemple de realizări constructive pentru acest tip de traductor sînt arătate în tabelul 3.5, iar diferite moduri posibile de utilizare sînt arătate schematic în fig. 3.8. (a — traductor diferenţial, b — traductor de unghi, c — traductor de bătăi radiale ale arborilor, d — traductor de temperatură, cu bimetal).

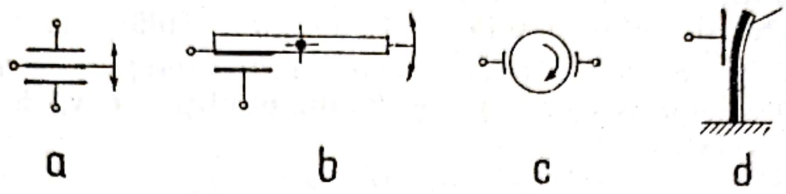


Fig. 3.8.

b) *Traductorul cu suprafaţa plăcilor variabilă.* Variaţia suprafeţei plăcilor condensatorului se realizează prin modificarea lungimii l, în cazul condensatoarelor plane (fig. 3.9, a) şi cilindrice tip „piston" (fig. 3.9,b) sau a unghiului α în cazul condensatoarelor rotative (fig. 3.9, d,e,f).

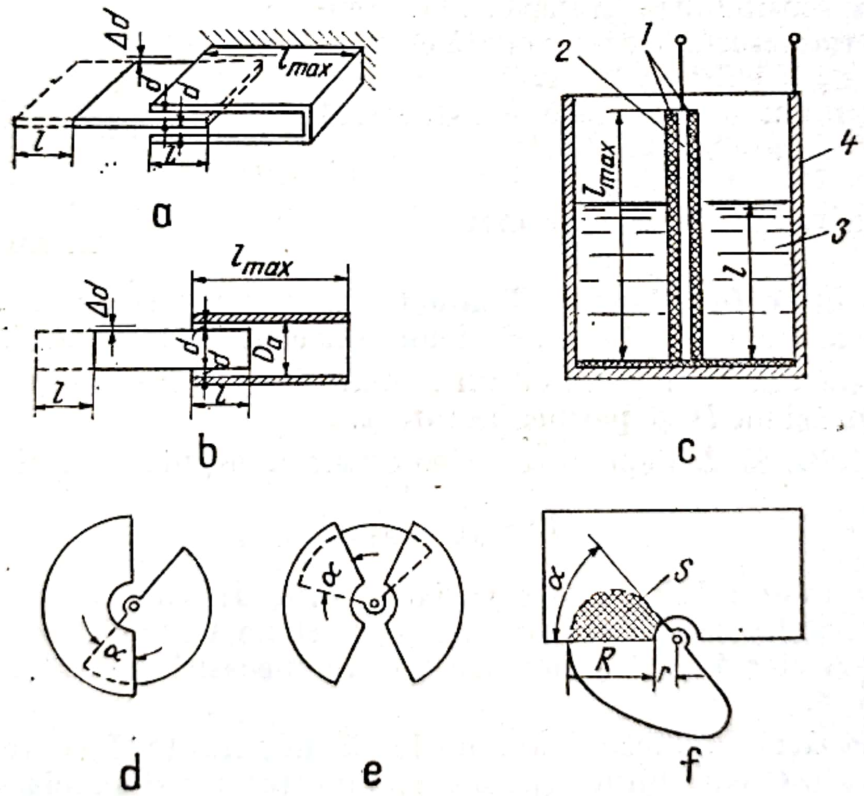


Fig. 3.9.

În figura 3.9,c este prezentat un traductor capacitiv pentru măsurarea nivelului unui lichid (*1* — dielectric; *2* — conductor metalic; *3* — lichid conductor; *4* — recipient).

Capacitatea traductorului variază conform relaţiilor

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{l}{l_{max}}; \quad \frac{C}{C_{max}} = \frac{\alpha}{\alpha_{max}} \tag{3.13}$$

rezultînd deci o legătură liniară între capacitate şi deplasare. Aceste traductoare prezintă şi o sensibilitate transversală din cauza imposibilităţii menţinerii aceleiaşi distanţe d pe toată lungimea plăcilor.

c) *Traductorul cu dielectric deplasabil.* Modificînd poziţia dielectricului între armăturile condensatorului (fig. 3.10), se obţine o variaţie de capacitate dată de relaţia

$$\frac{C}{C_0} = \frac{l}{l_{max}} \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r \frac{d_0}{d} + 1} = k \frac{l}{l_{max}} \tag{3.14}$$

în care C_0 este capacitatea traductorului cu dielectricul în afara plăcilor. Se observă că C variază liniar cu l. Teoretic, aceste tipuri de traductoare nu prezintă sensibilitate transversală. Sensibilitatea traductorului creşte odată cu micşorarea lui d_0 şi mărirea lui ε_r.

Un exemplu de realizare constructivă este arătat în tabelul 3.5.

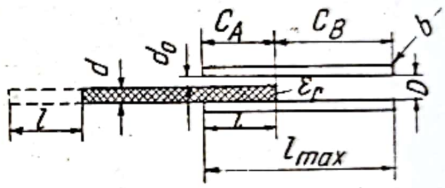


Fig. 3.10.

3.2.4. TRADUCTORUL INDUCTIV

Principiul de funcţionare. Traductorul inductiv transformă variaţia de lungime sau a unei alte mărimi mecanice în variaţie de inductanţă.

El constă dintr-o bobină cu un număr N de spire înfăşurate pe un miez de dimensiuni D şi permeabilitate μ.

Inductivitatea L depinde de elementele menţionate deci

$$L = f(N, \mu, D). \tag{3.15}$$

În funcţie de mărimea care variază (N, μ, D) ca urmare a variaţiei mărimii mecanice, se obţin diferite tipuri de traductoare inductive; toate acestea sînt însă traductoare pasive, necesitînd o sursă electrică de alimentare.

Traductoarele inductive au, pe lîngă inductanţa L, o rezistenţă R şi o capacitate C care influenţează sensibilitatea lor şi precizia măsurărilor. Pentru domeniul uzual al frecvenţei sursei de alimentare (5...50 kHz) se recomandă ca $\omega L \approx (1...10)\ R$. De asemenea, este necesar ca rezistenţa şi inductanţa conductorilor de legătură să fie mult mai mici decît cele ale traductorului.

Ca principale avantaje ale traductoarelor inductive sînt de menţionat: sensibilitate mare, robusteţe şi siguranţă în funcţionare. Principalul dezavantaj al acestor traductoare îl constituie pierderile calorice datorită

Scanned with OKEN Scanner

rezistenţei lor electrice relativ mare, care conduc la erori în măsurare şi crează incertitudini în ceea ce priveşte funcţionarea corectă a traductoarelor.

Tipuri de traductoare inductive. În funcţie de modul în care se realizează variaţia inductanţei, principalele tipuri constructive folosite în tensometrie sînt :

a) *Traductorul cu întrefier variabil*, reprezentat schematic în figura 3.11, este unul din tipurile cele mai întrebuinţate. La acest traductor se modifică întrefierul prin deplasarea unei armături de fier mobile. Dacă $L_{max} = \mu_0 \mu_f N^2 \frac{S}{l_f}$ este inductanţa maximă obţinută cînd întrefierul $l_a = 0$, pentru o valoare oarecare a întrefierului se obţine

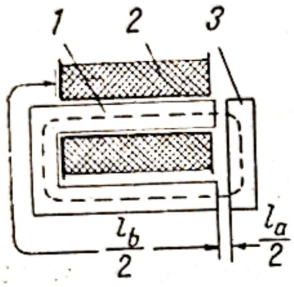


Fig. 3.11.

$$\frac{L}{L_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{l_a}{l_f} \cdot \frac{\mu_f}{\mu_a}} \qquad (3.16)$$

în care l_a, l_f reprezintă lungimea liniilor de cîmp magnetic în întrefier, respectiv în miezul de fier ; μ_0, μ_a, μ_f permeabilitatea în vid, în aer, respectiv în fier ; N numărul de spire ; S aria secţiunii miezului.

Se vede că rezultă o variaţie hiperbolică a inductanţei funcţie de mărimea întrefierului. Traductorul are o sensibilitate practic constantă numai pentru deplasări foarte mici ale armăturii.

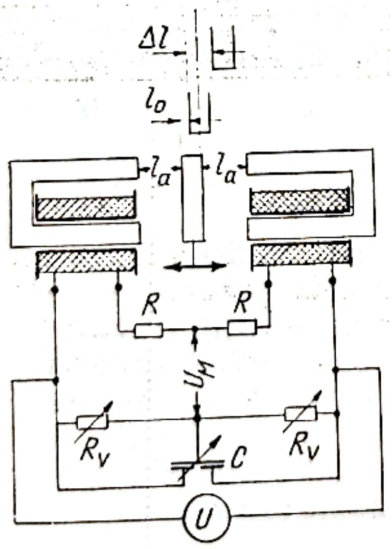


Fig. 3.12.

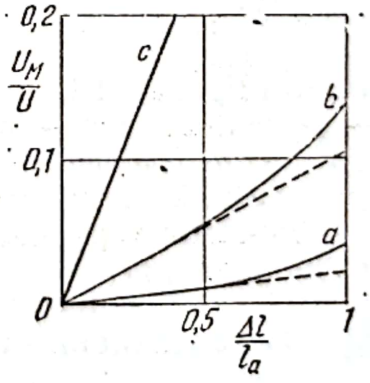


Fig. 3.13.

O sensibilitate constantă pentru deplasări mai mari şi o compensare a influenţelor nedorite ale variaţiilor de temperatură se obţine la traductorul diferenţial din figura 3.12 a cărei caracteristică este dată în figura 3.13 (a — pentru traductor cu miez masiv din fier moale ; b — cu miez

Scanned with OKEN Scanner

din tole de fier moale, c — pentru traductorul ideal; punctat s-a trasat tangenta de extrapolare a domeniului liniar).

b) *Traductorul cu miez deplasabil*, reprezentat schematic în figura 3.14 permite măsurarea unor deplasări mult mai mari decît tipul precedent. Prin deplasarea miezului de fier 1 în interiorul bobinei 2 se produce variaţia inductanţei conform relaţiei [25]

$$\frac{L}{L_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{l_a}{l_{Fe}} \cdot \frac{\mu_{Fe}}{\mu_a}} \tag{3.17}$$

unde L_{max} este inductanţa maximă care se obţine pentru $l_a = 0$; $l_{Fe} = 2\ l_b = 2l_f$ — lungimea liniei de cîmp în fier.

Relaţia (3.17) s-a obţinut pentru cazul cînd $S_m = S_a = S_f$ şi $\mu_m = \mu_f = \mu_F$.

Relaţia (3.17) este similară relaţiei (3.16) şi pune, de asemenea în evidenţă, legătura neliniară dintre inductanţă şi deplasare. Se obţine însă o bună liniaritate la traductorul diferenţial cu două bobine şi un

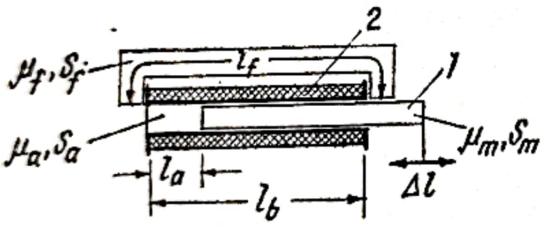


Fig. 3.14.

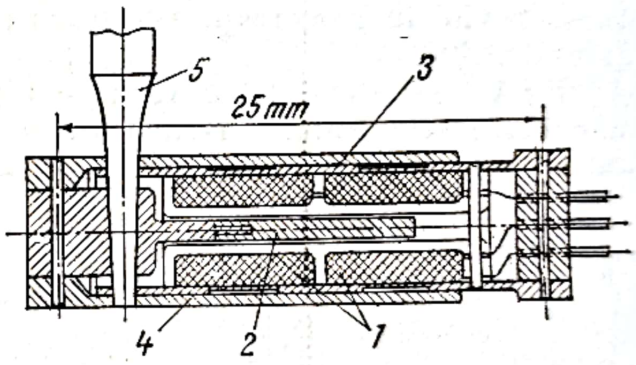


Fig. 3.15.

miez comun, din figura 3.15, în care: *1* reprezintă bobinele, *2* — miezul comun, *3* — ţeavă din fier, *4* — învelişul nemagnetic, *5* — ştiftul de blocare.

c) *Alte tipuri de traductoare inductive* se obţin realizînd variaţia conductanţei prin variaţia numărului de spire active, variaţia inductivităţii mutuale, prin modificarea permeabilităţii etc. Astfel de tipuri constructive sînt date în lucrarea [25].

3.2.5. TRADUCTORUL PIEZOELECTRIC

Principiul de funcţionare. S-a constatat că la anumite materiale în urma solicitării pe o direcţie în domeniul elastic a unui cristal apar pe direcţii perpendiculare sarcini electrice. Acest fenomen poartă numele de fenomen piezoelectric direct şi stă la baza funcţionării traductoarelor piezoelectrice, care permit măsurarea atît a forţelor şi tensiunilor, cît şi a deplasărilor rezultate prin deformarea cristalului.

Cristalele acestor materiale piezoelectrice au proprietăţi fizice diferite pe axe diferite astfel cum se arată în figura 3.16. în care: X_1, X_2, X_3 sînt axe electrice, Y_1, Y_2, Y_3 sînt axe mecanice (fiecare axă mecanică fiind perpendiculară pe axa electrică cu acelaşi indice) şi Z este axa optică, perpendiculară pe planul celorlalte axe.

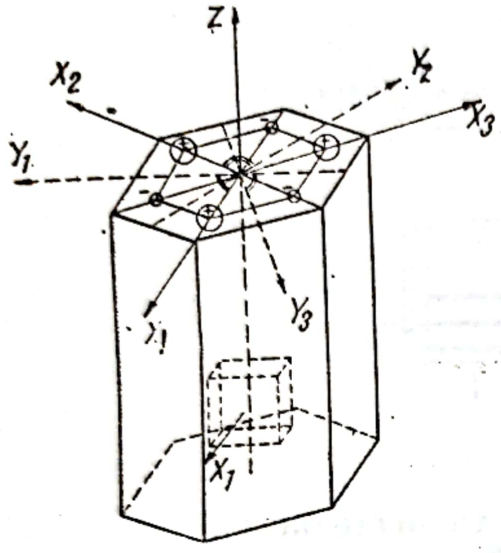


Fig. 3.16.

Sarcina electrică ce apare pe o axă X nu depinde de viteza cu care se aplică solicitarea mecanică pe axa Y corespunzătoare.

Traductoarele piezoelectrice sînt traductoare active, nefiind necesară sursă electrică de alimentare şi sînt reversibile (prin aplicarea unor sarcini electrice variabile pe o axă X se produce deformaţia pe direcţie perpendiculară Y).

Materialele piezoelectrice cele mai folosite în tensometrie sînt:

— *cuarţul*, care are o sensibilitate şi fidelitate mare (sarcină electrică relativ mare la o solicitare mecanică şi proporţională cu această solicitare), este utilizabil într-un domeniu relativ larg de temperatură (—193°C...+ 500°C); rezistivitatea lui scade puternic la creşterea temperaturii;

— *turmalina*, utilizată pentru traductoare de presiune însă numai la măsurări de scurtă durată sau la temperatură constantă, deoarece prezintă proprietăţi piroelectrice (o variaţie de 1°C produce o variaţie aparentă de presiune de 13 daN/cm²);

— *sarea Seignette*, cu o sensibilitate mult mai mare decît a cuarţului, dar cu o serie de dezavantaje faţă de celelalte materiale: rezistenţa mică la oboseală, fenomene de histerezis, influenţă mare a variaţiei de temperatură şi a umidităţii;

— *titanatul de bariu*, care prezintă avantajul principal că elementul traductor se poate realiza sub orice formă geometrică, cu posibilitatea orientării după dorinţă a axelor; rezultatele măsurărilor nu sînt practic influenţate de variaţia de temperatură, însă traductorul nu poate fi utilizat decît numai pînă la aproximativ 80°C; ca dezavantaj este menţionată rezistivitatea mică, din care cauză nu poate fi folosit la măsurări cvasistatice.

Tipuri de traductoare piezoelectrice. Principalele tipuri de traductoare piezoelectrice sînt reprezentate schematic în figura 3.17 în care: *a* reprezintă un traductor de deplasări, *b* traductor de alungiri, *c* traductor de forţă, *d* traductor de presiuni, *e* traductor de momente de răsucire şi *f* traductor de acceleraţii.

Scanned with OKEN Scanner

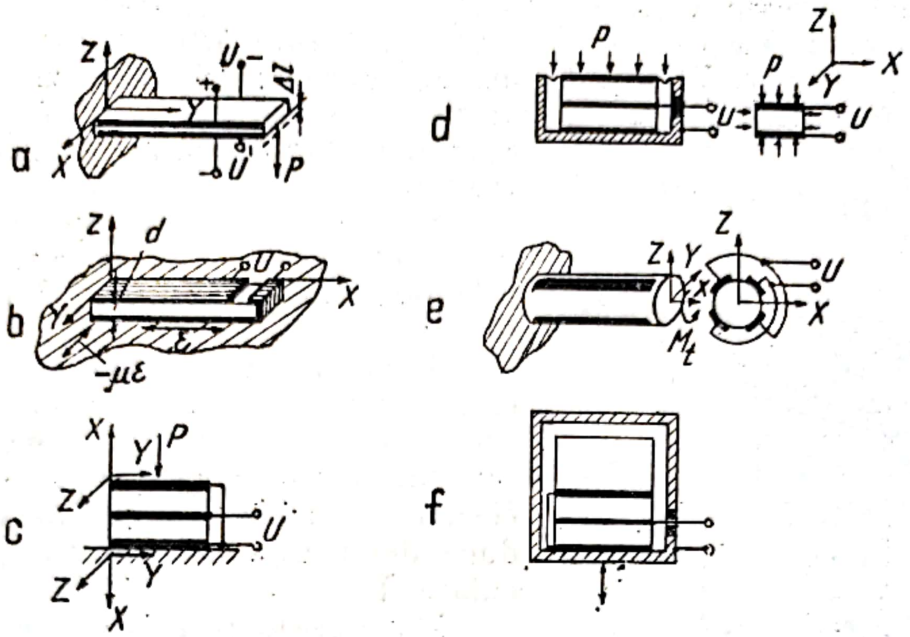


Fig. 3.17.

3.2.6. PRIVIRE GENERALĂ ASUPRA TRADUCTOARELOR ELECTROTENSOMETRICE

În afară de tipurile de traductoare susmenţionate s-au realizat şi alte tipuri de traductoare, unele dintre acestea fiind prezentate în tabelul 3.4.

Alegerea celui mai potrivit traductor ţelului urmărit la efectuarea unei lucrări experimentale contribuie în mare măsură la reuşita lucrării.

Pentru a uşura această alegere au fost prezentate în tabelul 3.4. cele mai folosite traductoare electrice cu principalele lor caracteristici.

3.3. PRINCIPII DE MĂSURARE

3.3.1. MONTAJUL ÎN PUNTE

Pentru realizarea unei măsurări de precizie, în tensometria electrică se foloseşte montajul în punte al traductoarelor. Relaţiile de bază din tensometria electrică ce exprimă legătura liniară dintre deformaţii şi variaţia parametrului electric şi dată de traductorul de măsură, pune uşor în evidenţă elementele componente ale circuitului de măsură.

Astfel, în cazul utilizării traductorului rezistiv rezultă conform relaţiei (3.9) că pentru a fi posibilă măsurarea unei alungiri $\varepsilon = 10^{-6} \ldots 10^{-3}$, cu un traductor cu rezistenţa electrică $R = 100$ ohmi şi constanta $k = 2$, este necesar ca circuitul de măsură să sesizeze variaţii de rezistenţă:

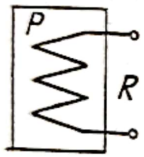
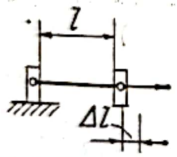
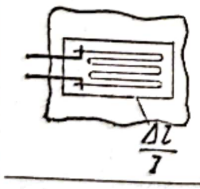
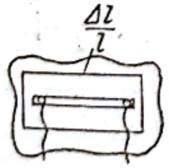
$$\Delta R = k\, R\, \varepsilon = 2 \times 10^2 \times (10^{-6} \ldots 10^{-3}) = 0{,}0002 \ldots 0{,}2\ \Omega.$$

Practic este foarte dificil să se măsoare, cu suficientă precizie, asemenea variaţii de rezistenţă cu ohmmetre obişnuite, fapt care impune

Scanned with OKEN Scanner

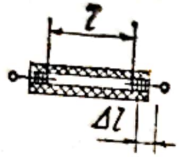
Tipuri de traductoare tensometrice [25]

Tabelul 3.4.

Nr. crt.	Tipul Traductorului	Reprezentarea schematică	Relația de funcționare	Domeniul de frecvență, Hz	Avantaje principale	Dezavantaje principale	Observații
0	1	2	3	4	5	6	7
	1. *Traductoare rezistive* Traductoare pasive; mărimile mecanice modifică rezistența electrică. Avantaje principale: ușor observabile și verificabile; nu se blochează; admit cabluri lungi în circuitul de măsură; permit realizarea de montaje speciale pentru rezolvarea unei mari diversități de probleme. Dezavantaj principal: variații mici de rezistență respectiv tensiuni utile mici.						
1	Traductor de presiune		$\frac{\Delta R}{R} = kp$	$0 \dots 10^5$	Simplitate; erori mici la presiuni mari	Sensibilitate mică; erori mari datorită variației de temperatură.	Indicat pentru măsurarea presiunilor foarte înalte (pînă la 12.000 daN/cm²) în special în laborator; devine foarte sensibil cu anumite semiconductoare.
2	Traductor cu fir liber		$\frac{\Delta R}{R} = k\frac{\Delta l}{l}$	$0 \dots 10^4$	Forțe relativ mici; erori 0,25%; nu este necesar adeziv; pînă la 300°C.	Pericol de suprasolicitarea firului; erori la variații rapide de temperatură	Frecvent folosit în captoarele de forță și presiune.
3	Traductor cu fir sau folie pe suport		$\frac{\Delta R}{R} = k\frac{\Delta l}{l}$	$0 \dots 10^6$	Erori mici; ieftin; multiple posibilități de utilizare; frecvențe mari	Sensibilitate foarte mică; solicitări mari; sensibil la umiditate.	Pentru analiza stărilor de tensiune; foarte utilizat la realizarea captoarelor; mare diversitate de tipuri.
4	Traductor cu semiconductoare		$\frac{\Delta R}{R} = k\frac{\Delta l}{l}$	$0 \dots 10^6$	Sensibilitate și limită de frecvență, mari.	Fragilitate mare; neliniaritate la alungiri mari.	Foarte indicate pentru captoare cu sensibilitate mare și limite mari de frecvență.

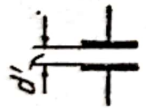
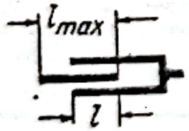
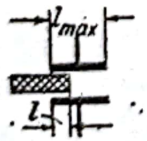
Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.1 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
5	Traductor cu lichid		$\frac{\Delta R}{R}=2\frac{\Delta l}{l}+\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2$	$0\ldots10^2$	Deplasări mari la forțe mici	Îmbătrînire; necesită măsuri speciale de depozitare	Adecvat pentru măsurări de deformații sau pentru captoare la lucrări în laborator cu caracter special
6	Traductor cu tub electronic		$i=k\frac{1}{d^2}$	$0\ldots10^2$	Echipament intermediar simplu.	Erori prin încălzirea catodului.	Conceput pentru măsurări de vibrații; nu este totuși folosit.

2. *Traductoare capacitive*

Traductoare pasive: mărimile mecanice modifică capacitatea unui condensator.
Avantaje principale: posibilități multiple de utilizare, inclusiv pentru temperaturi foarte ridicate; adecvate pentru forțe mici; neinfluențate de cîmpurile magnetice.
Dezavantaje principale: influențate de cîmpurile electrice perturbatoare; dificultăți la utilizarea unor cabluri lungi; rezistență internă foarte mare; perturbări în medii dielectrice (apă, ulei).

7	Traductor cu distanța dintre plăci variabilă		$\frac{C}{C'}=\frac{1}{1+\frac{\Delta d}{d'}}$	$0\ldots1)^3$	Sensibilitate foarte mare	Sensibilitatea funcție de distanța d, neliniară	Adecvat pentru captoare de presiune și în montaj diferențial pentru captoare de deplasări
8	Traductor cu suprafața plăcilor variabilă		$\frac{C}{C_{max}}=\frac{l}{l_{max}}$	$0\ldots1\,0^4$	Liniar	Sensibilitate tranversală	Utilizabil pentru scopuri speciale, de exemplu pentru captoare de unghiuri.
9	Traductor cu dielectric deplasabil		$\frac{\Delta C}{C_{aer}}=k\frac{l}{l_{max}}$	$0\ldots10^4$	Liniaritate bună, sensibilitate transversală redusă	—	Se pretează la perfecționări

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.4 (continuare)

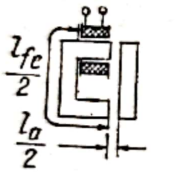
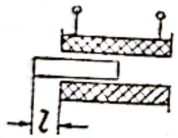
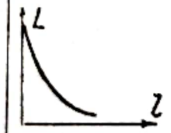
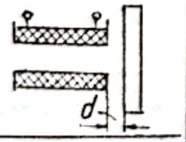
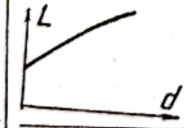
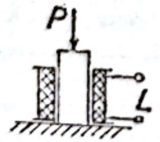
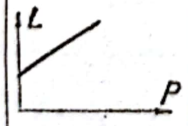
10	Traductor cu grosimea dielectricului variabilă		$\frac{\Delta C}{C_{aer}} = \frac{1-\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{\frac{d_1}{d_2}+\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}$	$0 \dots 10^4$	Fără contact cu piesa	Neliniar	Indicat în special pentru măsurarea grosimilor peliculelor

3. *Traductoare inductive*

Traductoare pasive: mărimile mecanice modifică inductivitatea unei bobine.

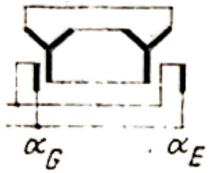
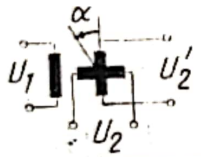
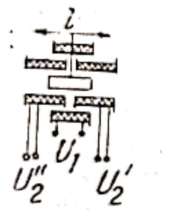
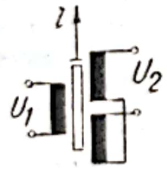
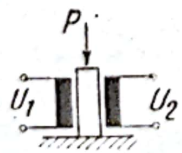
Avantaje principale: sensibilitate mare, robustețe; utilizare posibilă și cu conductoare lungi; nu au electrozi mobili și nu se blochează; nu apar influențe ale mediilor dielectrice (apă, ulei).

Dezavantaje principale: inductanța este legată de mărimile R și C, nedorite, care constituie surse de erori; funcționare perturbată de mediile magnetizabile sau cîmpuri magnetice.

11	Traductor cu armătură transversală		$\frac{L_{max}}{L} = \frac{1}{1+\frac{\mu_{aer}}{\mu_{Fe}}\frac{l_{Fe}}{l_{aer}}}$	$0 \dots 10^4$	Sensibilitate foarte mare	Neliniar; domeniu de măsură mic; forțele nu sînt neglijabile.	Adecvat ca traductor diferențial în special la măsurarea deplasărilor mici.
12	Traductor cu armătură mobilă			$0 \dots 10^4$	Adecvat și pentru deplasări foarte mari	Neliniar	Foarte răspîndit ca traductor diferențial pentru măsurarea deplasărilor.
13	Traductor cu variația fluxului			$0 \dots 10^2$	Se pot măsura deplasările materialelor nemagnetice fără contact mecanic	Neliniar; mare incertitudine de măsurare.	Foarte adecvat pentru măsurarea conductibilității, a adîncimii fisurilor și a grosimilor.
14	Traductor magneto-elastic			$0 \dots 10^3$	Foarte robust; randament mare	Neliniar.	Foarte adecvat ca traductor robust pentru forțe și presiuni.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.4 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
	4. *Traductoare cu transformator* Traductoare pasive; mărimile mecanice modifică cuplajul unui transformator; mărimile R și C au numai o importanță secundară. Avantaje principale: sensibilitate mare; robuste; adecvate și pentru cabluri lungi; nu sînt influențate de mediile dielectrice (apă, ulei). Dezavantaje principale: influențe ale mediilor magnetizabile sau cîmpurilor magnetice perturbatoare.						
15	Traductor rotativ		$\alpha_G = \alpha_E$	0 ... 1	Erori de măsură extrem de mici; în limite foarte mari independent de tensiunea de alimentare; permite și folosirea unor cabluri foarte lungi.	Sînt necesare inele de contact rotative; numai pentru măsurări cvasistatice.	Variația cuplajului se face prin modificarea poziției bobinelor; sînt cunoscute multe și variate sisteme cu caracteristici diferite; fiecare sistem oferă mare siguranță la măsurări; foarte răspîndit pentru *redarea* unghiurilor („arbore electric"); pentru *măsurarea* unghiurilor sînt foarte rar folosiți.
16	Resolver		$U_2 = U_1 \sin\alpha$ $U_2' = U_1 \cos\alpha$	0 ... 20	Erori de măsurare extrem de mici.	Sînt necesare inele de contact rotative	Variația cuplajului se face prin modificarea poziției bobinelor; sînt cunoscute multe și variate sisteme cu caracteristici diferite; siguranță în funcționare; foarte utilizate la instalațiile de calcul.
17	Traductor de deplasare diferențial, cu transformator		$\frac{U_2' - U_2''}{U_1} = kl$	0 ... 10^4	Siguranță foarte mare în funcționare.	Domeniul liniar de măsură, relativ mic	Variația cuplajului se face prin modificarea lungimii miezului; sînt cunoscute diverse sisteme pentru măsurarea deplasărilor și a unghiurilor; nu sînt necesare inele de contact rotative; foarte răspîndit pentru măsurarea deplasărilor și în captoare; utilizat și pentru instalațiile de calcul.
18	Traductor diferențial cu transformator și ecran		$\frac{U_2}{U_1} = kl$	0 ... 10^4	Pentru rezolvarea unei mari diversități de probleme; Sensibilitate transversală mică; sînt necesare forțe mici; cursa ecranului nelimitată.	Defazare între U_1 și U_2	Variația cuplajului se face prin deplasarea unui ecran metalic în care iau naștere curenți turbionari. Este posibilă perfecționarea lor; se folosesc și pentru măsurarea unghiurilor.
19	Traductor magneto-elastic cu transformator		$\frac{U_2}{U_1} = A + BP$	0 ... 10^3	Robust; nu se blochează.	Nesiguranță la măsurarea momentelor de torsiune.	Variația cuplajului se face prin modificarea permeabilității miezului ca urmare a unei solicitări mecanice; important pentru măsurarea forțelor și pentru măsurarea, fără contact, a momentelor de torsiune.

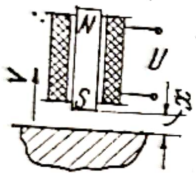
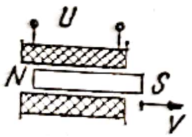
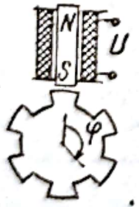
Scanned with OKEN Scanner

5. *Traductoare cu inducție*

Traductoare active: mărimile mecanice influențează variația fluxului magnetic într-o bobină; tensiunea indusă este proporțională cu viteza.
Avantaje principale: foarte robuste; nu este necesară energie auxiliară; nu sînt influențate de mediile dielectrice (apă, ulei).
Dezavantaje principale: consumă energie de la obiectul de măsurat; în parte, sînt necesare forțe mari; perturbări provocate de cîmpurile magnetice continue și variabile ca și de piesele feromagnetice.

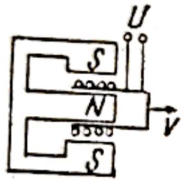
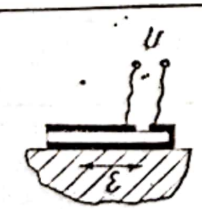
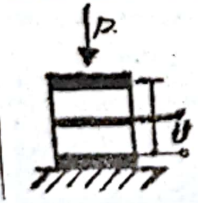
5.1. Traductoare electromagnetice

Variația fluxului se face prin mișcarea unei piese din fier moale sau a unei piese magnetizate; bobine fixe.
Avantaje principale: nici un electrod mobil; nu se blochează.
Dezavantaje principale: de cele mai multe ori necesită forțe mari și introduc erori de neliniaritate mari.

20	Traductor de deplasare		$U = -w\frac{d\Phi}{dt}v$	$0 \ldots 10^3$	Foarte simplu	Foarte neliniar; forțe foarte mari; mari distorsiuni de fază	Utilizat numai pentru măsurări calitative; foarte răspîndit; utilizabil și ca excitator de vibrații.
21	Traductor cu magnet mobil		$U = kv$	$0 \ldots 10^4$	Foarte simplu; sensibilitate mare; liniar.	–	Avantajos și ca traductor diferențial; se utilizează și în captoarele seismice.
22	Traductor de turație		$U_{\approx} = k\frac{d\varphi}{dt}$ $f = k'\frac{d\varphi}{dt}$	$0 \ldots 10^2$ în funcție de turație	Foarte robust și sigur în funcționare; tensiunea, respectiv frecvența, proporțională cu turația.	Nu indică sensul turației; tensiunea conține un număr de armonici.	Cel mai important traductor de turație. Varietate mare a formelor de prezentare în comerț; rotorul poate fi și un magnet permanent multipolar.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.4 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
	5.2. Traductoare electrodinamice Variația fluxului se face prin mișcarea unui conductor sau a unei bobine într-un cîmp magnetic fix; utilizate și ca parte componentă în captoare. Avantaj principal: rezistență internă mică Dezavantaj principal: necesari magneți permanenți grei.						
23	Traductor cu bobină mobilă		$U = kv$	$0 \ldots 10^3$	Relativ sigur în funcționare	Deplasarea măsurabilă este limitată; borne mobile.	Mare diversitate de forme constructive pentru măsurarea vibrațiilor cu captori seismici; utilizat și ca microfon și ca excitator de vibrații.
24	Dinam de curent continuu		$U \approx -k\frac{d\varphi}{dt}$	$0 \ldots 10^3$ în funcție de turație	Indică sensul rotației	Inelele de contact pot provoca blocări și perturbări.	Foarte răspîndit ca traductor de turație.
	6. *Traductoare piezoelectrice* Traductoare active: forțele sau deformațiile, respectiv mărimile mecanice derivate din acestea, deformează cristalele; sarcinile electrice care apar pe anumite fețe ale cristalelor constituie o măsură pentru mărimile mecanice; mare diversitate de forme constructive în special pentru măsurarea presiunilor și a accelerațiilor; proprietățile sînt determinate numai de natura cristalelor. Avantaje principale: mare sensibilitate; este realizabilă o frecvență proprie foarte mare. Dezavantaje principale: rezistență internă mare care are drept consecințe sensibilitate față de cîmpurile electrice perturbatoare și o rezistență de intrare foarte mare a circuitului intermediar; frecvența limită inferioară > 0; sensibilitatea depinde de capacitatea cablului de măsură.						
25	Traductor de alungiri cu cristal din titanat de bariu		$U = k\varepsilon$	$10 \ldots 10^5$	Sensibilitate foarte mare	Acționează la forțe mari; casant; sensibilitate transversală foarte mare; mari erori de măsurare.	Adecvat în special pentru măsurarea alungirilor dinamice foarte mici
26	Traductor de forță cu cristal din cuarț		$U = kP$	$10^{-3} \ldots 10^5$	Liniaritate foarte bună; domeniul de temperatură mare; domeniu de măsură foarte mare.	Necesită rezistență de izolație foarte mare.	Utilizat adesea și pentru măsurări de presiuni, momente și accelerații.

Scanned with OKEN Scanner

utilizarea unui montaj electric în punte, montaj ce poate să asigure precizia dorită. Puntea devine astfel elementul principal al oricărui aparat pentru măsurări tensoelectrice.

Cel mai simplu tip de montaj în punte este puntea Wheatstone (fig. 3.18). În montajul clasic această punte este alimentată de la o sursă de curent continuu iar pe diagonala de măsură este conectat un galvanometru.

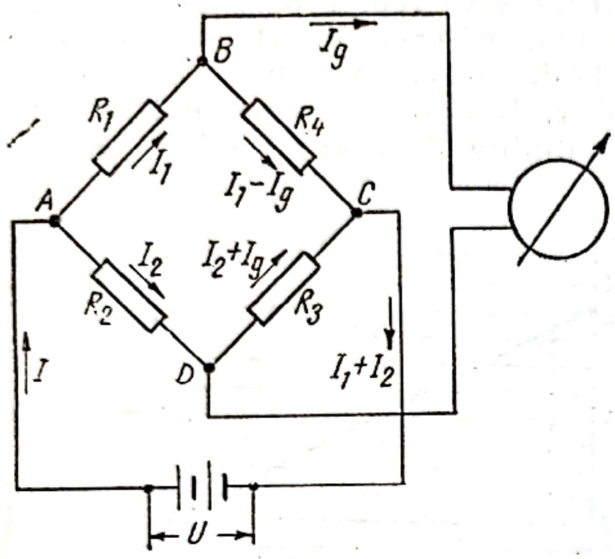


Fig. 3.18.

Dacă rezistenţele punţii satisfac condiţia :

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \qquad (3.18)$$

prin galvanometru nu trece curent ($I_g = 0$), puntea este echilibrată. Orice modificare suferită de una din cele patru rezistenţe va afecta starea de echilibru a punţii, avînd ca urmare trecerea unui curent prin galvanometru ($I_g \neq 0$), curent a cărui valoare va caracteriza această modificare de rezistenţă.

Păstrarea liniarităţii relaţiei $\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$ şi evitarea deteriorării traductorului tensometric aplicat pe piesa de măsurat sînt asigurate atîta timp cît intensitatea curentului care trece prin traductor nu provoacă o încălzire excesivă a acestuia. De aceea, practic se limitează această intensitate la valoarea $I_t = 20...30$ mA, ea determinînd — funcţie şi de valorile rezistenţelor din braţele punţii — mărimea tensiunii U aplicate la bornele A, C ale diagonalei de alimentare.

Intensitatea curentului I_g care trece prin galvanometru în cazul dezechilibrării punţii (cînd relaţia 3.18 nu este satisfăcută) se obţine cu relaţia :

$$I_g = U \frac{R_2 . R_4 - R_1 . R_3}{R_g (R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_2 \cdot R_4 (R_1 + R_2)} . \qquad (3.19)$$

Cu ajutorul acestei relaţii se va putea analiza majoritatea problemelor legate de metodele de măsurare cu punţile tensometrice. Aceste metode sînt :

Măsurarea prin metoda deviaţiei (punte neechilibrată). Dependenţa dată de relaţia de mai sus, dintre intensitatea curentului din galvanometru şi oricare din rezistenţele punţii, de exemplu rezistenţa R_1 a traductorului de măsură, nu este liniară.

În timpul măsurării unei deformaţii interesează variaţia de curent corespunzător unei variaţii ΔR_1 pe care o produce alungirea ε asupra

Scanned with OKEN Scanner

rezistenţei traductorului. Deoarece, după cum s-a văzut, această variaţie de rezistenţă este foarte mică în raport cu rezistenţa R_1, neliniaritatea funcţiei $I_g = f(R_1)$ introduce erori de măsurare care se pot neglija.

În fig. 3.19, a se reprezintă diagrama de variaţie a curentului I_g pentru un interval mare de variaţie a rezistenţei R_1, cuprins între 150 ohmi şi 350 ohmi. Curba obţinută scoate în evidenţă neliniaritatea relaţiei dintre cele două mărimi. În fig. 3.19, b este reprezentată tot variaţia curentului I_g, însă pentru un domeniu mult mai restrîns al variaţiei rezistenţei R_1 şi anume de la 245 la 255 ohmi, ceea ce corespunde unor variaţii foarte mari ($\pm$ 2%) ale alungirii ε. Este o reprezentare la o scară mărită a porţiunii încercuite din curba din fig. 3.19, a; apropierea ei de o

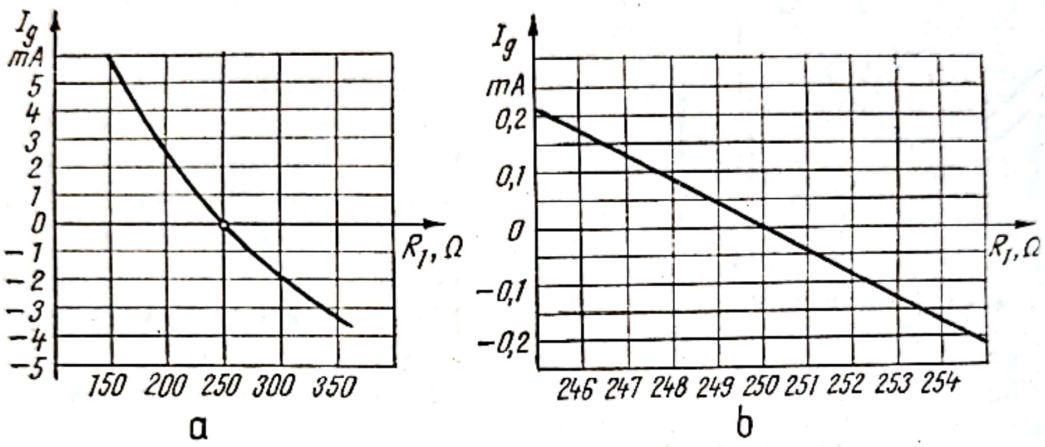


Fig. 3.19.

linie dreaptă permite să se tragă concluzia că, pentru cazurile practice, dependenţa dintre I_g şi R_1 se poate admite ca fiind liniară. Eroarea datorită abaterii de la liniaritate nu depăşeste în acest caz 0,3% din valorile extreme ale domeniului de variaţie, ceea ce satisface cerinţele de precizie ale tensometriei electrice.

Proporţionalitatea dintre alungirea ε şi variaţia ΔR a rezistenţei traductorului, pe de o parte şi proporţionalitatea rezultată din admiterea liniarităţii relaţiei de legătură dintre variaţia de rezistenţă şi intensitatea I_g a curentului pe care îl provoacă în circuitul galvanometrului, pe de altă parte, permit ca să se etaloneze scala instrumentului direct în valori ε. Dacă iniţial puntea a fost echilibrată ($I_g = 0$), apariţia unei deformaţii provoacă un curent I_g care deviază acul indicator al galvanometrului. Valoarea lui ε se va citi direct pe cadran, întrucît aşa cum s-a arătat mai sus, variaţia funcţiei $I_g = f(R_1)$ se poate considera liniară.

În aceasta constă metoda de măsurare directă prin „deviaţie" sau prin „punte neechilibrată", metodă căreia îi corespund, constructiv, unele tipuri de aparate de tensometrie electrică.

Dacă metoda de măsurare prin citire directă prezintă avantajul unei reduceri a timpului de efectuare a măsurării, deoarece nu este necesară decît o singură operaţie de echilibrare a punţii, în schimb ea are un dezavantaj în faptul că valoarea intensităţii curentului I_g care indică apariţia alungirii ε depinde de tensiunea U de alimentare a punţii, indicaţiile

Scanned with OKEN Scanner

instrumentului putînd fi deci afectate de eventualele fluctuaţii ale valorii acestei tensiuni. Observaţia se referă în special la punţile alimentate în curent alternativ prin intermediul generatoarelor de joasă frecvenţă. Totuşi, performanţele foarte bune, obţinute în domeniul sistemelor de stabilizare de durată a tensiunii de alimentare, au făcut ca în realizările recente de aparate de tensometrie electrică să fie utilizată tot mai mult această metodă (citire directă).

Măsurarea prin metoda de zero (puntea echilibrată). Pentru ca puntea să fie echilibrată (prin galvanometru nu circulă curent), trebuie ca diferenţa de potenţial între bornele B şi D ale diagonalei de măsură (fig. 3.18) să fie nulă, rezultînd relaţia (3.18).

Deci, pentru ca puntea să fie echilibrată, nu este necesar ca rezistenţele tuturor braţelor punţii să fie egale între ele, fiind posibilă utilizarea unor traductoare de diferite rezistenţe, în funcţie de condiţiile şi posibilităţile concrete de măsurare.

Din relaţia (3.18) se vede că se poate afla una din rezistenţe în funcţie de celelalte trei, de exemplu : $R_1 = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4$.

Modificînd raportul rezistenţelor R_2 şi R_3 şi variind în mod corespunzător rezistenţa R_4, se poate obţine, cu precizie valoarea rezistenţei R_1 în domenii foarte largi de măsură. Pe acest principiu se bazează punţile obişnuite pentru măsurarea rezistenţelor.

Dacă R_1 este rezistenţa traductorului de deformaţie, iar R_4 este o rezistenţă variabilă calibrată, ale cărei valori pot fi cunoscute în orice moment, rezultă că variaţiile ΔR_1 pe care le capătă traductorul, ca o consecinţă a deformaţiei piesei supusă cercetării pot fi uşor măsurate prin intermediul a două echilibrări succesive ale punţii : una înainte de deformarea (încărcarea) piesei şi cealaltă, după deformarea acesteia.

Astfel, din cele două condiţii de echilibru :

— înainte de deformare

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad \text{şi}$$

— după deformare, deci după dezechilibrare şi reechilibrarea punţii

$$(R_1 + \Delta R_1) R_3 = R_2 (R_4 + \Delta R_4)$$

rezultă, după reducere $\Delta R_1 = \frac{R_2}{R_3} \Delta R_4$ şi cum, în virtutea relaţiei fundamentale a tensometriei electrice $\Delta R_1 = k R_1 \varepsilon$ se obţine valoarea deformaţiei specifice $\varepsilon = \frac{R_2}{k R_1 R_3} \Delta R_4$.

Deoarece k, R_1, R_2, R_3 sînt cunoscute, relaţia de mai sus devine :

$$\varepsilon = K \cdot \Delta R_4$$

Scanned with OKEN Scanner

Această expresie arată că, în locul etalonării aparatului în unități de rezistență electrică, este posibilă etalonarea lui pentru citirea alungirilor.

În acest caz diferența dintre valorile citite pe scala potențiometrului pentru pozițiile de zero ale acului indicator, înainte și după producerea deformației în piesă, respectiv după reechilibrarea punții, reprezintă alungirea ε căutată.

În aceasta constă sistemul de măsurare prin „metoda de zero" sau prin „punte echilibrată". Această metodă este mai precisă decît „metoda deviației", deoarece rezultatele sînt independente de tensiunea de alimentare, astfel că variațiile acesteia nu influențează valorile citite. Instrumentul de măsură nu servește în acest caz decît ca indicator de zero (pentru aducerea curentului I_g la valoarea zero), astfel încît el nu necesită decît un singur reper (cel de zero), în afară de cazul cînd instrumentul este utilizat și pentru verificarea altor parametri ai punții (de exemplu tensiunea de alimentare).

3.3.2. PUNTEA CU IMPEDANȚE

În cele expuse mai sus s-a presupus că brațele punții sînt constituite din rezistențe electrice pure, puntea fiind alimentată în curent continuu.

Datorită dificultăților de realizare a amplificatoarelor de curent continuu, se preferă punțile alimentate în curent alternativ. În acest caz însă trebuie să se țină seama că brațele punții sînt impedante. Rezistența activă o constituie rezistența traductoarelor și a cablurilor de legătură, iar reactanțele apar datorită capacității și inductanței distribuite a cablurilor producîndu-se o defazare. În cazul traductoarelor capacitive și inductive intervin de asemenea în circuit capacități, inductanțe și rezistențe.

Condiția de echilibru va fi, în acest caz :

$$\bar{Z}_1 \bar{Z}_3 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_4 \qquad (3.20)$$

Această relație implică o dublă echilibrare : o echilibrare rezistivă și o echilibrare de fază (de anulare a defazării).

Deci condiția de echilibru rezistiv de la punțile alimentate în curent continuu este necesară și în cazul punților alimentate în curent alternativ, dar nu este și suficientă, deoarece în acest din urmă caz poate să apară și un dezechilibru capacitiv (sau inductiv), care poate fi cu atît mai mare cu cît lungimea cablurilor de legătură a traductoarelor este mai mare și cu cît frecvența curentului oscilatorului ce alimentează puntea este mai ridicată ; de aceea pentru realizarea unor măsurări de precizie, la punțile care lucrează prin metoda deviației (citire directă) și la cele care funcționează cu o frecvență de peste 1000 Hz, se face și o echilibrare de fază.

Se poate demonstra că atît defazarea produsă de o capacitate cît și cea produsă de o reactanță inductivă (a cablului) poate fi anulată (compensată) cu ajutorul unei capacități.

Scanned with OKEN Scanner

3.3.3. CONECTAREA TRADUCTOARELOR ÎN PUNTE

Traductoarele tensometrice se pot conecta în punte conform schemelor prezentate în fig. 3.20.

Schema 3.20, a reprezintă montajul în *sfert de punte*: puntea este alcătuită dintr-un traductor tensometric exterior și 3 rezistențe calibrate montate în aparat. Schema 3.20, b reprezintă montajul în *semi-punte* și este alcătuită din două traductoare tensometrice exterioare și două rezistențe calibrate aflate în aparat. Schema 3.20, c reproduce montajul în *punte completă*; în toate brațele punții se află conectate traductoare tensometrice.

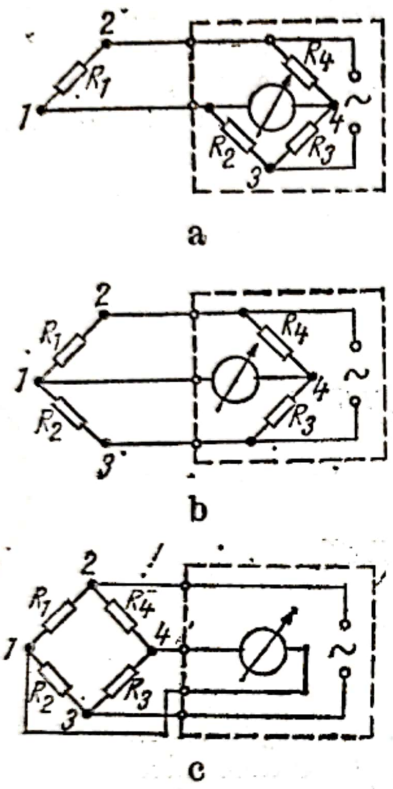


Fig. 3.20.

La alegerea schemei de conectare, în funcție de natura traductorului și de scopul urmărit, se ține seama de faptul că efectele din două brațe adiacente ale unei punți Wheatstone se scad iar efectele din două brațe opuse se adună.

Notînd cu $\Delta R_1, \ldots, \Delta R_4$ variațiile de rezistență ale traductoarelor, rezultă la bornele diagonalei de măsură un semnal electric proporțional cu $\left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_3}{R}\right) - \left(\frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_4}{R}\right)$, avînd astfel posibilitatea de a elimina efectele nedorite, respectiv de a „amplifica" pe cele dorite, deci de a mări sensibilitatea punții.

În cazul în care în același braț al punții se montează mai multe traductoare (de exemplu n traductoare de rezistență R) nu se obține o creștere de sensibilitate a montajului deoarece semnalul obținut este proporțional cu $\frac{n\Delta R}{nR} = \frac{\Delta R}{R}$.

3.4. ERORI DE MĂSURARE PROVOCATE DE INFLUENȚE PERTURBATOARE EXTERIOARE

În circuitele de măsură cu traductoare, de orice tip, apar o serie de influențe perturbatoare, exterioare punții de măsură și care afectează rezultatele măsurărilor.

Astfel, în cazul unui traductor rezistiv, în afară de variația de rezistență corespunzătoare deformației mecanice, dezechilibrul punții de măsură poate fi provocat și de alte cauze, cum ar fi: variația de temperatură pe care o suferă piesa, traductorul sau cablurile de legătură, efectele termoelectrice, reacțiile chimice și cîmpurile electromagnetice parazitare

Scanned with OKEN Scanner

care pot interveni în timpul măsurării. Influenţe perturbatoare similare apar şi la celelalte tipuri de traductoare (vezi tabelul 3.4.). În cadrul acestui paragraf se va trata numai cazul traductoarelor rezistive.

3.4.1. INFLUENŢA VARIAŢIEI DE TEMPERATURĂ

Expresia generală a variaţiei rezistenţei electrice a unui traductor rezistiv. Un traductor t de lungime l şi rezistenţă R, supus unei creşteri $\mathrm{d}T$ de temperatură, va avea o variaţie de rezistivitate $\mathrm{d}\varrho$ şi o variaţie de lungime $\mathrm{d}l_t$. La traductorul lipit de o piesă variaţia de lungime va fi egală cu aceea a piesei, $\mathrm{d}l_p$, deci cu $\mathrm{d}l = \mathrm{d}l_p - \mathrm{d}l_t$ mai mare decît a

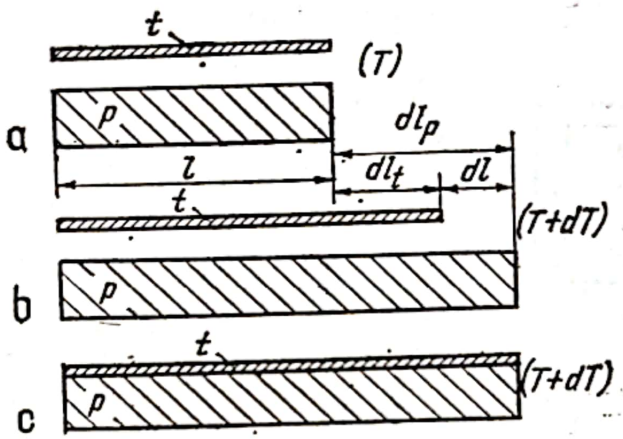


Fig. 3.21.

traductorului liber (fig. 3.21, a, b, c); această lungire suplimentară acţionează cu o variaţie de lungime produsă de o solicitare mecanică.

Ţinînd seama de cele două variabile, T şi l, care produc variaţia rezistenţei electrice a traductorului, se poate scrie:

$$\frac{\mathrm{d}R}{R} = \frac{1}{R}\,\frac{\partial R}{\partial T}\,\mathrm{d}T + \frac{1}{R}\,\frac{\partial R}{\partial l}\,\mathrm{d}l$$

şi cum $\dfrac{1}{R}\,\dfrac{\partial R}{\partial T}\,\mathrm{d}T = \left(\dfrac{1}{\varrho}\,\dfrac{\partial \varrho}{\partial T} + \dfrac{1}{l}\,\dfrac{\partial l}{\partial T} - \dfrac{1}{s}\,\dfrac{\partial s}{\partial T}\right)\mathrm{d}T = (\alpha_\varrho - \alpha_t)\,\mathrm{d}T$

şi

$$\frac{1}{R}\,\frac{\partial R}{\partial l}\,\mathrm{d}l = k\,\frac{\mathrm{d}l}{l} = k\,(\alpha_p - \alpha_t)\,\mathrm{d}T$$

se obţine relaţia

$$\frac{\mathrm{d}R}{R} = (\alpha_\varrho - \alpha_t)\,\mathrm{d}T + k(\alpha_p - \alpha_t)\,\mathrm{d}T \qquad (3.21)$$

Scanned with OKEN Scanner

Dacă variaţia de temperatură este ΔT şi piesa pe care este lipit traductorul are, în urma unei solicitări mecanice, o alungire ε, relaţia (3.21) devine :

$$\frac{\Delta R}{R} = (\alpha_\rho - \alpha_t)\Delta T + k(\alpha_p - \alpha_t)\Delta T + k\varepsilon. \qquad (3.22)$$

În relaţiile (3.21) şi (3.22) :

$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial T}$ reprezintă coeficientul de variaţie cu temperatura a rezistivităţii materialului traductorului ;

$\alpha_t = \frac{1}{l}\frac{\partial l}{\partial T}$ — coeficientul de dilatare liniară a traductorului ;

$\alpha_p = \frac{1}{l}\frac{\partial l}{\partial T}$ — coeficientul de dilatare liniară a piesei pe care este lipit traductorul.

Trebuie adăugat că, în general, intervine în plus şi o variaţie a factorului k al traductorului, conform relaţiei :

$$k = k_0[1 - f(\varepsilon, T)] \qquad (3.23)$$

Într-un domeniu limitat de temperatură şi alungire, factorul k rămîne practic constant pentru constantan, astfel cum se poate vedea în figura 3.22 în care se dă în procente variaţia lui k pentru trei materiale utili-

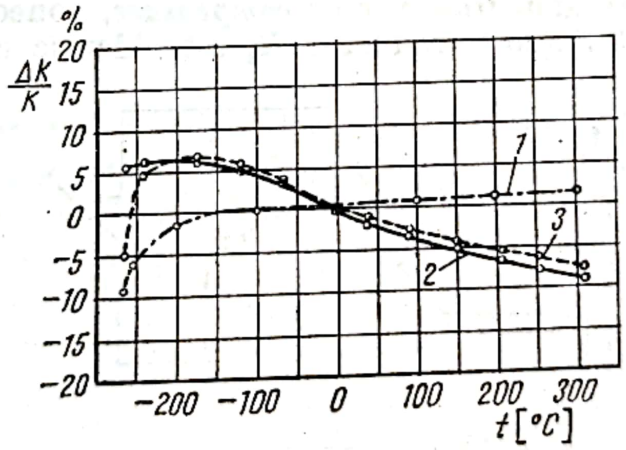


Fig. 3.22.

zate la confecţionarea traductoarelor (1 — constantan ; 2 — nichel-crom ; 3 — aliaj cu platină).

Toate aceste efecte ale variaţiei de temperatură produc variaţii mari ale rezistenţei traductorului care, fiind indicate de aparatul de măsură ca alungiri ε aparente, introduc erori la măsurarea valorilor alungirilor produse în realitate de solicitarea mecanică. De aceea se iau măsuri pentru eliminarea sau compensarea efectelor variaţiei de temperatură.

Scanned with OKEN Scanner

Compensarea efectului variaţiei de temperatură. a) *Cazul traductoarelor rezistive metalice.* O bună compensare a efectului variaţiei de temperatură se obţine la *traductoarele autocompensate* a căror reţea este realizată prin legarea în serie a două reţele din aliaje diferite, unul avînd coeficientul de temperatură pozitiv iar celălalt negativ, astfel încît se obţine $(\alpha_\rho - \alpha_t) + k(\alpha_p - \alpha_t) \approx 0$, adică suma termenilor dependenţi de temperatură din relaţia (3.22) este practic zero. La aceste traductoare, alungirea aparentă este limitată la $\varepsilon_{ap} = \pm 0{,}5$ μm/m·°C. Realizarea practică a traductoarelor autocompensate este dificilă şi din această cauză costul lor este ridicat, ceea ce restrînge utilizarea acestora la cazurile în care influenţa variaţiei de temperatură nu poate fi eliminată în alt mod.

O soluţie mai uşor de realizat şi deci mai ieftină este aplicată la *traductoarele cu coeficientul de temperatură adaptat* materialului structurii care se măsoară. Aceste traductoare au $\alpha_t = \alpha_p$, astfel că din relaţia (3.22) rămîne necompensat numai termenul $(\alpha_\rho - \alpha_t)$, care la materialele folosite pentru confecţionarea traductoarelor este de maximum 2×10^{-5}, la constantan avînd valori mult mai mici. De menţionat că pentru un anumit aliaj coeficientul de temperatură depinde atît de compoziţia chimică cît şi de prelucrarea lui la rece. Se realizează traductoare adaptate pentru diferite metale (oţel, aluminiu, cupru), traductoare la care alungirea aparentă poate fi limitată la $\varepsilon_{ap} = \pm$ 2μm/m·°C.

Pentru ambele tipuri, compensarea este asigurată pentru un domeniu de temperaturi cuprinse între 10°C şi 100°C.

O metodă generală de compensare a efectelor temperaturii, aplicabilă pentru toate tipurile de traductoare, cu rezultate foarte bune, deoarece realizează şi compensarea variaţiei cu temperatura a factorului k, constă în utilizarea unui *traductor de compensare*, conectat într-un braţ al punţii (fig. 3.23). Acest traductor R_2 este identic cu cel activ (R_1)

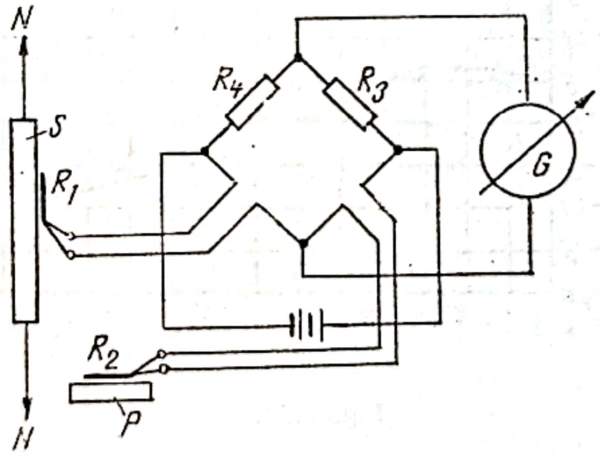


Fig. 3.23.

aplicat pe structura S pentru măsurarea alungirii şi se lipeşte cu acelaşi adeziv pe o piesă P separată (plăcuţă, profil oarecare) confecţionată din materialul structurii.

Piesa cu traductorul de compensare este plasată astfel încît acesta să sufere aceeaşi variaţie de temperatură ca şi cel activ, fără să fie însă solicitat mecanic. Cele două traductoare fiind identice şi suferind aceeaşi

Scanned with OKEN Scanner

variație de temperatură, vor avea aceeași variație de rezistență ΔR; traductorul de compensare se conectează în punte într-un braț adiacent celui în care se află cel activ și astfel, conform celor arătate la pct. 3.3.3., puntea va rămîne echilibrată. Dezechilibrul acesteia se va produce numai în urma solicitării mecanice a structurii pe care se află traductorul activ și deci indicațiile punții nu vor fi afectate de variațiile de temperatură din timpul măsurărilor.

b) *Cazul traductoarelor cu semiconductoare.* Pentru siliciu α_t este neglijabil în raport cu α_ρ astfel că relația (3.22) devine:

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_\rho \Delta T + \pi E (\alpha_p - \alpha_t) \Delta T + \pi E \varepsilon \qquad (3.24)$$

În domeniul de temperatură $-20°C \ldots + 80°C$, coeficientul α_ρ este aproape constant și are valoarea $\alpha_\rho \approx 12 \times 10^{-4}$. Pentru tipul p, coeficientul $\alpha_t = 4 \times 10^{-6}$, astfel că diferența $(\alpha_p - \alpha_t)$ este pozitivă pentru structurile uzuale.

Compensarea are loc dacă: $\alpha_\rho + \pi E(\alpha_p - \alpha_t) = 0$. Rezultă că π trebuie să fie negativ, deci trebuie utilizat siliciul tip n. Se realizează traductoare cu siliciu tip n, adaptate pentru diferite metale ca și traductoarele metalice.

Pentru o mai bună compensare se poate lega în serie un traductor p cu unul n, obținîndu-se:

$$\alpha_{\rho p} - \alpha_{\rho n} = (k_p + k_n)(\alpha_p - \alpha_t) \qquad (3.25)$$

ceea ce constituie un avantaj al traductoarelor cu siliciu.

Trebuie menționat că este mai greu de acționat asupra variațiilor lui k produse de variațiile simultane ale coeficientului de piezorezistivitate π și ale modulului de elasticitate E. Din cauză că în urma lipirii apare o stare de pretensionare diferită la fiecare traductor, valorile coeficienților k și legile lor de variație sînt diferite. Este necesar de aceea ca aplicarea traductoarelor cu semiconductoare să se facă cu deosebită grijă pentru a se asigura aceleași condiții în ceea ce privește gradienții de temperatură, condițiile geometrice și, în special, lipirea.

c) *Cazul traductoarelor pentru măsurări la temperaturi înalte.* În cazul măsurărilor la temperaturi înalte se depășesc limitele domeniului de temperatură pentru care se poate asigura autocompensarea. De aceea, compensarea acestor efecte se poate face fie cu ajutorul traductoarelor de compensare, fie prin calcul, scăzînd din valorile alungirilor indicate de traductoare alungirile aparente produse de variația de temperatură, alungiri care corespund în relația (3.22) termenilor dependenți de temperatură. Dacă se ține seama de relația (3.23) care exprimă variația cu temperatura a factorului k și considerînd liniară dilatarea termică a materialului

Scanned with OKEN Scanner

piesei pe care este lipit traductorul, din relația (3.22) prin integrare în intervalele $(T_0, T_0 + \Delta T)$ și $(l_0, l_0 + \Delta l)$ se obține relația :

$$\frac{1}{k_0}\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon + \Phi(T) \tag{3.26}$$

în care

$$\Phi(T) = \alpha_p \Delta T + \int_{T_0}^{T_0+\Delta T} a(T)\, dt \quad \text{și}$$

$$a(T) = \frac{1}{k_0}\left[\alpha_p - (1 + k_0)\,\alpha_t\right] - f(\varepsilon, T)\left[\alpha_p - \alpha_t\right]$$

Deci, pentru aflarea alungirii reale ε este necesar să se cunoască termenul $\Phi(T)$ din relația (3.26). Acest termen, care reprezintă alungirea aparentă ε_{ap}, se determină experimental pentru fiecare caz în parte, adică pentru fiecare combinație traductor — adeziv — material (al piesei de încercat). Pentru aceasta, pe o plăcuță confecționată din același material cu al piesei de încercat se lipește un traductor de același tip cu cele active și aplicînd aceeași tehnologie de lipire. Plăcuța, nesolicitată mecanic, este supusă unei variații de temperatură pînă la limita necesară încercării sau cea prescrisă pentru combinația traductor — adeziv, măsurîndu-se la o punte tensometrică variația de rezistență respectiv alungirea aparentă $\varepsilon_{ap} = \frac{1}{k_0}\frac{\Delta R}{R_0} = \Phi(T)$. S-a dovedit experimental că funcția $\Phi(T)$ își păstrează valorile și în cazul în care piesa este solicitată mecanic, atît timp cît temperatura rămîne sub o valoare limită, caracteristică combinației traductor-adeziv.

3.4.2. INFLUENȚA CONDUCTOARELOR DE LEGĂTURĂ

Rezistența conductoarelor de legătură a traductoarelor la puntea de măsură influențează rezultatele măsurărilor; aceste influențe depind atît de mărimea rezistenței acestor conductoare cît și de variația acesteia în timpul efectuării măsurărilor.

Influența în cazul unei rezistențe constante a conductoarelor. Influența rezistenței se manifestă prin :

a) *modificarea punctului de nul* (deriva de zero) al punții; aceasta este o modificare aditivă și influența ei poate fi ușor eliminată prin efectuarea diferenței dintre valorile obținute la cele două echilibrări ale punții care lucrează prin metoda de zero (echilibrarea dinaintea încărcării și echilibrarea după încărcarea piesei);

b) *modificarea sensibilității punții*; din cauza rezistenței conductoarelor are loc o cădere de tensiune, astfel că tensiunea de alimentare a traductorului scade și odată cu aceasta scade și mărimea semnalului la instrumentul de măsură, acest semnal fiind proporțional cu tensiunea de alimentare.

Scanned with OKEN Scanner

Într-adevăr, dacă un traductor de rezistență R care suferă o variație ΔR este legat direct la o punte de măsură se obține o valoare $\varepsilon = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R}$ iar în cazul în care este legat printr-un conductor de rezistență $2r$ (fig. 3.24) se obține o valoare $\varepsilon' = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R + 2r}$ mai mică decît ε.

Pentru a obține adevărata valoare a deformației specifice în loc de constanța k a traductorului se folosește valoarea corectă k'; relația folo-

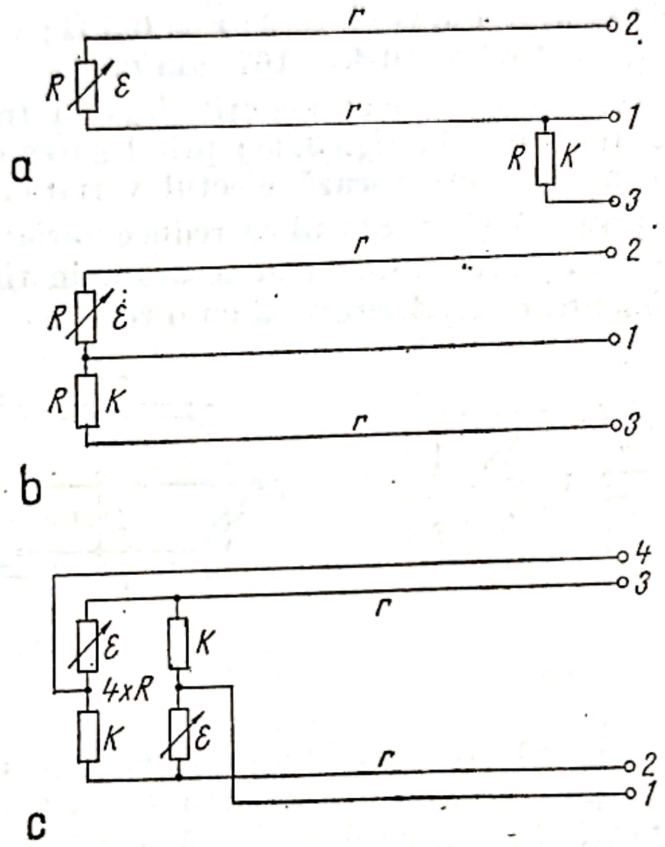


Fig. 3.24.

sită în acest scop depinde de numărul traductoarelor și al conductoarelor de legătură folosite (fig. 3.24); astfel:

— pentru cazul din fig. 3.24, a: $k' = k\left(1 - \frac{2r}{R}\right)$ (3.28)

— pentru cazul din fig. 3.24, b: $k' = k\left(1 - \frac{r}{R}\right)$ (3.29)

— pentru cazul din fig. 3.24, c: $k' = k\left(1 - \frac{2r}{R}\right)$ (3.30)

Scanned with OKEN Scanner

Influența în cazul variației rezistenței conductoarelor. Prin încălzire, conductorul își modifică rezistența și din această cauză la puntea de măsură se înregistrează o deformație specifică aparentă.

Considerînd cazul din fig. 3.24, a, la o creștere de temperatură ΔT, variația de rezistență a conductorului va fi $2r\alpha\Delta T$ rezultînd deformația aparentă :

$$\varepsilon_{ap} = \frac{1}{kR} 2r\,\alpha\,\Delta T \qquad (3.31)$$

De exemplu dacă $R = 120\ \Omega$; $k = 2$; $r = 0{,}5\ \Omega$; $\alpha = 0{,}004$ și $\Delta T = 10°$ C, rezultă $\varepsilon_{ap} = 1{,}67 \times 10^{-4} = 167\ \mu m/m$.

Pentru eliminarea acestui efect nedorit, legarea traductorului activ în punte se face cu trei fire ca în fig. 3.25; prin legarea celui de al treilea fir în brațul adiacent se compensează efectul variației de temperatură.

Acest montaj prezintă și avantajul că reduce variația căderii de tensiune provocată de variația rezistenței traductorului în timpul măsurărilor, asigurînd astfel alimentarea traductorului cu o tensiune relativ constantă,

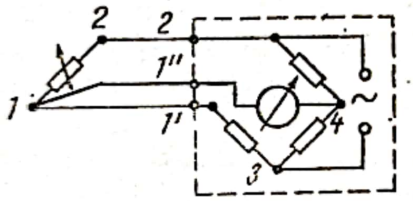


Fig. 3.25.

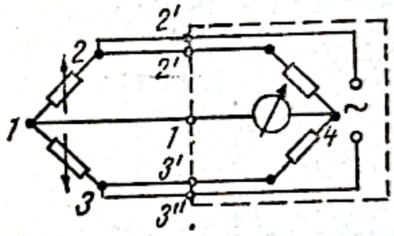


Fig. 3.26.

ceea ce conduce la mărirea preciziei de măsurare. În același scop se folosește montajul cu cinci conductoare pentru cazul a două traductoare active aflate la distanță de puntea de măsură (fig. 3.26).

3.4.3. INFLUENȚA REZISTENȚEI DE IZOLAȚIE A TRADUCTORULUI

Între rețeaua metalică a traductorului și piesă trebuie realizată o rezistență de izolație cît mai mare pentru a se elimina sau reduce la minimum scurgerile de curent care afectează rezultatele măsurărilor. Rezistența de izolație R_{iz} reprezintă o rezistență în paralel cu rezistența R a traductorului astfel că rezistența efectivă din brațul punții va fi

$$R' = \frac{R}{1 + \dfrac{R}{R_{iz}}} \qquad (3.32)$$

Scanned with OKEN Scanner

deci la o variaţie ΔR a traductorului activ se va măsura o deformaţie specifică $\varepsilon' = \frac{\Delta R}{kR'}$ în loc de $\varepsilon = \frac{\Delta R}{kR}$. În plus, dacă în timpul măsurărilor valoarea rezistenţei de izolaţie se modifică, puntea va măsura variaţii de rezistenţă suplimentare care nu corespund unor variaţii de deformaţie specifică.

Pentru a reduce cît mai mult aceste influenţe trebuie asigurate valori cît mai mari pentru rezistenţa de izolaţie a traductorului. Se recomandă ca aceste valori să nu scadă sub 1000 MΩ. De regulă, la o bună lipire şi o bună protecţie contra umidităţii se asigură rezistenţe de izolaţie de ordinul zecilor de mii şi chiar sutelor de mii de megohmi.

3.4.4. INFLUENŢA EFECTULUI TERMOELECTRIC ŞI A REACŢIILOR CHIMICE

În cazul utilizării punţilor tensometrice alimentate în curent continuu, pot să apară, în anumite condiţii, tensiuni parazite prin efectul termoelectric sau prin reacţii chimice locale în punctele de contact ale traductoarelor tensometrice cu conductoarele prin care se realizează legătura la aparatul de măsură.

Se ştie că dacă apare o diferenţă de temperatură între punctul de sudură a două fire din metale diferite şi extremităţile acestora, se produce o tensiune termoelectrică:

$$E_{th} = \beta \Delta T \tag{3.33}$$

unde β este tensiunea termoelectrică specifică, exprimată în $\mu V/°C$.

Deoarece firul reţelei traductorului şi firele de legătură sînt din metale diferite, în cazul în care cele două puncte de conexiune se încălzesc diferit, va apare între ele o diferenţă de tensiuni termoelectrice:

$$\Delta E_{th} = E'_{th} - E''_{th} = \beta(\Delta T_{a'} - \Delta T_{a''}) = \beta \Delta T$$

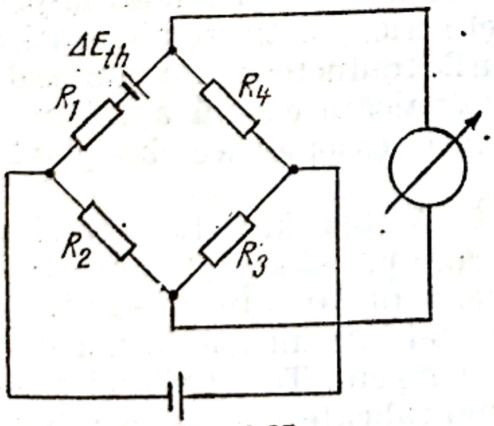


Fig. 3.27.

În această situaţie schema echivalentă a punţii este cea din figura 3.27.

Sub influenţa acestei diferenţe de tensiuni, puntea echilibrată înainte de apariţia diferenţei de temperaturi ΔT, se va dezechilibra, circuitul instrumentului de măsură fiind străbătut de curentul i_{th}. Situaţia se prezintă ca şi cum rezistenţa R_1 din braţul punţii ar fi suferit o variaţie $\Delta R_1/R_1$ ca urmare a deformării piesei pe care este aplicat traductorul R_1. Se poate demonstra că în cazul tensiunii termoelectrice ΔE_{th} apărută în braţul rezistenţei R_1,

Scanned with OKEN Scanner

variația specifică a acestei rezistențe este:

$$\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)_{th} = \frac{\Delta E_{th}}{U} \cdot \frac{R_1 + R_4}{R_1} = \frac{\beta}{U} \cdot \frac{R_1 + R_4}{R_1} \cdot \Delta T \qquad (3.34)$$

căreia îi corespunde o „deformație specifică" aparentă

$$\varepsilon_{th} = \frac{1}{k}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)_{th}$$

Se poate ilustra influența efectului termoelectric printr-un exemplu: Fie o punte cu $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, în care R_1 este rezistența unui traductor cu rețea din constantan, material a cărui tensiune termoelectrică în raport cu cuprul este, conform tabelului 3.1, $\beta = 43\ \mu V/°C$.

Dacă una din conexiunile traductorului este expusă direct radiației solare iar cealaltă conexiune se găsește în umbra cablului de legătură, ele se vor afla la temperaturi diferite. Considerînd o diferență de temperatură $\Delta T = 2°C$, diferența tensiunilor termoelectrice va fi $\Delta E_{th} = 2 \cdot 43 = 86\mu V$ ceea ce, la o tensiune de alimentare a punții $U = 2$ V, duce la indicarea unei deformații specifice aparente

$$\varepsilon_{th} = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)_{th} = \frac{1}{2} \cdot \frac{86 \times 10^{-6}}{2} \cdot \frac{2R}{R} = 43 \cdot 10^{-6}$$ (s-a considerat constanta $k = 2$).

Este evident că variația tensiunilor termoelectrice în timpul efectuării măsurării va provoca erori importante. Stabilitatea termică este destul de greu de realizat deoarece inerția termică a capetelor subțiri de ieșire ale traductorului și ale conductoarelor de legătură este neînsemnată, starea de temperatură a conexiunilor modificîndu-se ușor în timpul măsurării datorită curenților de aer sau radiațiilor unor surse calorice.

Unul din mijloacele de evitare a apariției diferențelor de tensiuni termoelectrice constă în aplicarea unui material de protecție (care servește și ca protecție contra umidității) peste conexiunile traductorului. Un alt mijloc constă în utilizarea traductoarelor tensometrice cu rețele confecționate din aliaje avînd tensiunea termoelectrică specifică β cît mai mică, cum ar fi de exemplu aliajul izoelastic (vezi tabelul 3.1). În sfîrșit un alt mijloc de eliminare a efectelor tensiunilor termoelectrice la încercările statice constă în repetarea măsurării, inversînd legăturile traductorului la puntea de măsură și luînd apoi media celor două citiri ca valoare exactă a deformației specifice a piesei. În acest scop unele punți tensometrice sînt prevăzute cu un comutator de inversare.

În afara tensiunilor termoelectrice pot să mai introducă erori și tensiunile ce apar în urma reacțiilor chimice care pot să aibă loc în cazul conexiunilor prin strîngere, cu ajutorul bornelor filetate. În acest caz se formează un element galvanic datorită prezenței într-un mediu umed și salin a două metale diferite în punctele de strîngere. Tensiunile electromotoare ale acestor elemente galvanice sînt mai ridicate decît cele termoelectrice și au o variație foarte mare în timp. Măsurile de eliminare sau reducere a acestor tensiuni constau în protejarea conexiunilor împotriva umezelii din atmosferă sau prin realizarea conexiunilor prin sudură sau prin lipire.

Scanned with OKEN Scanner

3.4.5. INFLUENȚA SENSIBILITĂȚII TRANSVERSALE A TRADUCTORULUI

Sensibilitatea transversală și eroarea de măsurare datorită acesteia. Traductoarele metalice își pot modifica rezistența și din cauza alungirilor ce au loc pe direcția perpendiculară pe axa longitudinală a rețelei. Această proprietate se numește *sensibilitatea transversală* a traductorului; de dorit ar fi ca această sensibilitate să fie nulă. În realitate, atît traductoarele cu fir cît și cele din folie au o sensibilitate transversală, care în majoritatea cazurilor este neglijată în cazul solicitării monoaxiale exercitate în lungul rețelei, pentru care este definit un factor de sensibilitate k. În cazul solicitării biaxiale trebuie să se țină seama și de sensibilitatea transversală pentru a obține rezultate mai exacte.

În general, variația relativă a rezistenței traductorului este dată de relația:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_l\ \varepsilon_l + k_t \varepsilon_t \tag{3.35}$$

în care:

ε_l, ε_t sînt deformațiile specifice care au loc paralel, respectiv perpendicular pe axa rețelei;
k_l — factorul de sensibilitate pe direcția axei longitudinale;
k_t — factorul de sensibilitate pe direcția transversală.

În cazul solicitării monoaxiale $\varepsilon_t = -\mu\varepsilon_l$ astfel că relația (3.35) devine:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_l\,(1 - \mu q)\varepsilon_l \tag{3.36}$$

unde $q = \dfrac{k_t}{k_l}$ reprezintă coeficientul de sensibilitate la deformație transversală, pe scurt sensibilitatea transversală. Ținînd seama de relația (3.9) folosită în mod obișnuit pentru traductoarele rezistive rezultă:

$$k = k_l(1 - \mu q) \tag{3.37}$$

Valoarea factorului k, indicată de furnizor, pentru un lot de traductoare, este determinată în urma solicitării monoaxiale cu o deformație $\varepsilon = \varepsilon_l$ și considerînd $\mu = 0{,}3$.

Dacă traductorul este aplicat pe o direcție înclinată față de direcția principală de solicitare are loc o eroare de măsurare care este dată de relația:

$$e_m = \frac{q\left(\dfrac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} + \mu\right)}{1 - \mu q} \times 100 \tag{3.38}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care

e_m este eroarea în % a deformației specifice măsurate în lungul axei traductorului.

Relația (3.38) arată că eroarea depinde în principal de q și de raportul alungirilor ε_t și ε_l. Dacă de exemplu se măsoară deformația specifică transversală în cazul unei solicitări monoaxiale cu un traductor cu $q = 3\%$ rezultă $\varepsilon_t/\varepsilon_l = -1/\mu$ și $e_m \approx 9\%$.

Corectarea rezultatelor măsurărilor. Influența sensibilității transversale asupra rezultatelor măsurărilor poate fi corectată prin calcul, folosind în acest scop o serie de relații:

a) *În cazul rozetei pe două direcții*, presupunînd că axele celor două traductoare coincid cu direcțiile principale de solicitare, cu relațiile:

$$\varepsilon'_x = \frac{(1 - \mu q)(\varepsilon_x - q\varepsilon_y)}{1 - q^2} \tag{3.39 a}$$

$$\varepsilon'_y = \frac{(1 - \mu q)(\varepsilon_y - q\varepsilon_x)}{1 - q^2} \tag{3.39 b}$$

în care $\varepsilon_x = \varepsilon_{l_1}$ și $\varepsilon_y = \varepsilon_{l_2}$ sînt deformațiile specifice necorectate, măsurate de traductorul 1, respectiv traductorul 2 al rozetei; ε'_x, ε'_y — deformațiile specifice corectate.

Avînd în vedere că $1 - q^2 = 0{,}995$ deci aproximativ 1, relațiile se mai pot scrie astfel:

$$\varepsilon'_x = (1 - \mu q)(\varepsilon_x - q\,\varepsilon_y) \tag{3.40 a}$$

$$\varepsilon'_y = (1 - \mu q)(\varepsilon_y - q\,\varepsilon_x) \tag{3.40 b}$$

Dacă în locul factorului k se introduce în aparat factorul k_l dat de relația (3.37), relațiile (3.40) devin:

$$\varepsilon'_x = \varepsilon''_x - q\,\varepsilon''_y \tag{3.41 a}$$

$$\varepsilon'_y = \varepsilon''_y - q\,\varepsilon''_x \tag{3.41 b}$$

în care ε''_x și ε'_y sînt deformațiile specifice măsurate cu constanta k_l la aparat.

Scanned with OKEN Scanner

b) *În cazul rozetei dreptunghiulare pe trei direcții* se folosesc relațiile:

$$\varepsilon_1' = \frac{1 - \mu q}{1 - q^2}(\varepsilon_1 - q\,\varepsilon_3) \tag{3.42}$$

$$\varepsilon_2' = \frac{1 - \mu q}{1 - q^2}[\varepsilon_2 - q(\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_2)] \tag{3.43}$$

$$\varepsilon_3' = \frac{1 - \mu q}{1 - q^2}(\varepsilon_3 - q\,\varepsilon_1) \tag{3.44}$$

în care: ε_1, ε_2, ε_3 sînt deformațiile specifice măsurate de fiecare traductor al rozetei;

ε_1', ε_2', ε_3' sînt deformațiile specifice corectate.

S-a presupus că cele trei traductoare ale rozetei au același coeficient q, ceea ce se întîmplă de obicei.

Valorile deformațiilor specifice principale pot fi calculate cu relațiile:

$$\varepsilon_{max}' = \frac{1 - \mu q}{1 - q^2}(\varepsilon_{max} - q\,\varepsilon_{min}) \tag{3.45 a}$$

$$\varepsilon_{min}' = \frac{1 - \mu q}{1 - q^2}(\varepsilon_{min} - q\,\varepsilon_{max}) \tag{3.45 b}$$

în care ε_{max} și ε_{min} sînt valorile deformațiilor specifice principale stabilite pe baza valorilor ε_1, ε_2, ε_3, necorectate.

Relațiile (3.45) se folosesc obișnuit sub forma:

$$\varepsilon_{max}' = \varepsilon_{max}\left[\frac{1 - \mu q}{1 - q^2}\left(1 - q\frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}}\right)\right] \tag{3.46 a}$$

$$\varepsilon_{min}' = \varepsilon_{min}\left[\frac{1 - \mu q}{1 - q^2}\left(1 - q\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{min}}\right)\right] \tag{3.46 b}$$

În cazul cînd cele trei traductoare au coeficienții q de valori diferite relațiile (3.42...3.44) se complică simțitor.

Scanned with OKEN Scanner

3.5. CAPTOARE PENTRU MĂSURAREA MĂRIMILOR MECANICE

3.5.1. GENERALITĂȚI

Prin termenul de captor se definește un dispozitiv sau aparat care transformă o variație a unei mărimi mecanice într-un semnal electric proporțional cu variația mărimii ce se studiază.

Foarte frecvent, în alcătuirea unui captor intră unul sau mai multe traductoare construite ca dispozitive *de uz general*, bine individualizate, ce se disting clar în ansamblul pe care îl formează captorul. Uneori însă, această distincție cu greu poate fi făcută și ca atare noțiunile de captor și traductor tind să se confunde.

În cadrul acestui paragraf se prezintă unele aspecte privind principiile constructive, calculul, proiectarea și utilizarea captoarelor pentru măsurarea mărimilor mecanice.

Captoarele ce se utilizează pentru măsurarea mărimilor mecanice au o mare varietate de tipuri constructive, forme și dimensiuni, destinate unor domenii foarte variate ale tehnicii și științei, în care se impun, uneori, condiții foarte severe privind dimensiunile de gabarit, temperatura de lucru, presiunea, etc. Astăzi aproape că nu este domeniu de activitate în care să nu se utilizeze astfel de captoare. Ele se întîlnesc în aviație și medicină, în industria petrolieră și în biomecanică, în industria feroviară și cea energetică, în cercetare și în învățămînt.

Se află în uz captoare de înaltă precizie fabricate de firme specializate, dar se întîlnesc tot mai frecvent construcții originale, realizate în diverse laboratoare și ateliere, pentru rezolvarea unor probleme proprii de cercetare sau de producție.

O clasificare a captoarelor după principiul fizic de transformare a variației mărimii mecanice în variație a unei mărimi electrice este dată în tabelul 3.5.

Foarte utilă pentru dezvoltările ulterioare ale acestui paragraf este clasificarea captoarelor după tipul mărimii ce se măsoară și anume captoare pentru măsurarea deplasărilor, rotirilor, presiunilor, forțelor, cuplurilor de răsucire, vitezelor, accelerațiilor sau pentru măsurarea a două sau mai multe componente ale torsorului de reducere al unui sistem de sarcini.

3.5.2. CARACTERISTICILE GENERALE ALE CAPTOARELOR

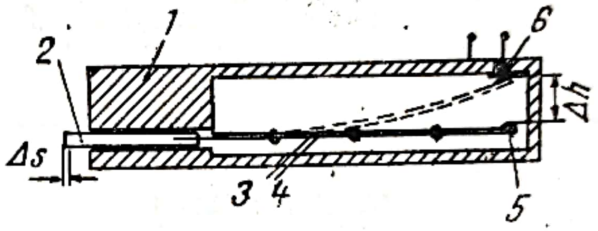
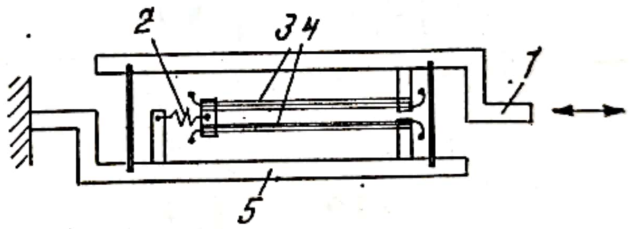
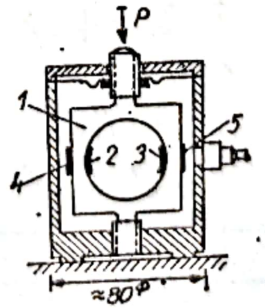
La proiectarea și utilizarea captoarelor trebuie avute în vedere o serie de caracteristici metrologice, constructive și funcționale ale acestora, dintre care cele mai importante sînt [34]:

— *sarcina*: este mărimea fizică aplicată captorului în vederea obținerii unui semnal electric: forță, deplasare, accelerație, presiune etc.;

— *sarcina nominală*: cea mai mare valoare a sarcinii ce se poate aplica captorului un timp indefinit, în condițiile garantării tuturor caracteristicilor acestuia;

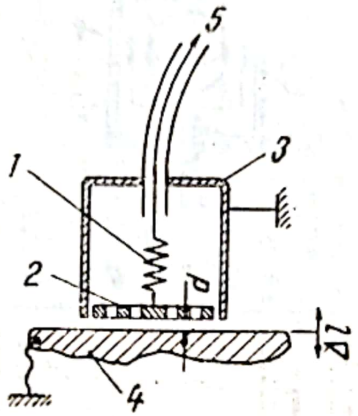
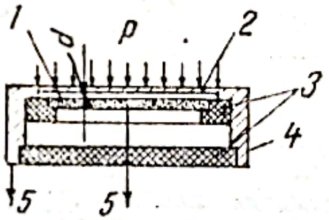
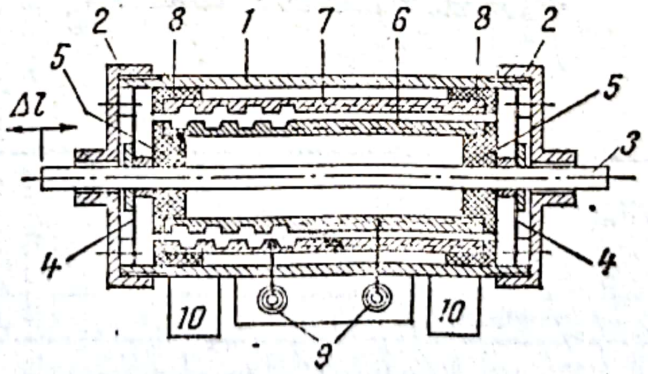
Scanned with OKEN Scanner

Clasificarea principalelor tipuri de captoare *Tabelul 3.5*

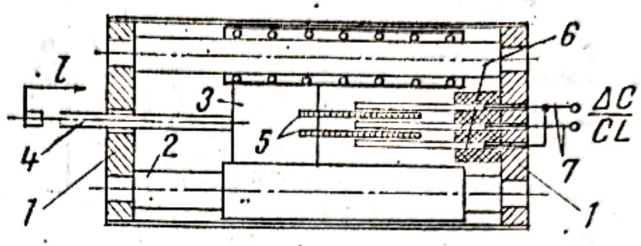
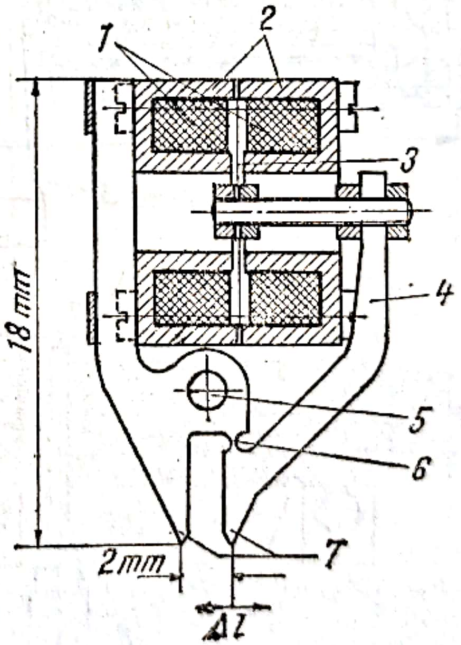
Tipul captorului	Principiul constructiv	Tipuri de mărimi ce se pot măsura	Domeniul de frecvenţe Hz	Exemplificare: Schiţa de principiu	Exemplificare: Descriere, observaţii
1	2	3	4	5	6
Rezistiv	cu contact	deplasări	0—100		*1* — carcasă *2* — palpator *3,4* — lamele *5* — contact mobil *6* — contact fix Contactul se închide cînd $\Delta s = \frac{2d\Delta h}{l}$ în care *d* este distanţa dintre axele celor două lamele
	cu traductoare nelipite	deformaţii deplasări forţe presiuni acceleraţii	0—10000		*1* — jug mobil *2* — arc *3, 4* — traductoare nelipite *5* — carcasă
	cu traductoare rezistive obişnuite	deformaţii deplasări forţe presiuni acceleraţii	0—100000		*1* — element elastic *2,3,4,5* — traductoare

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.5 (continuare)

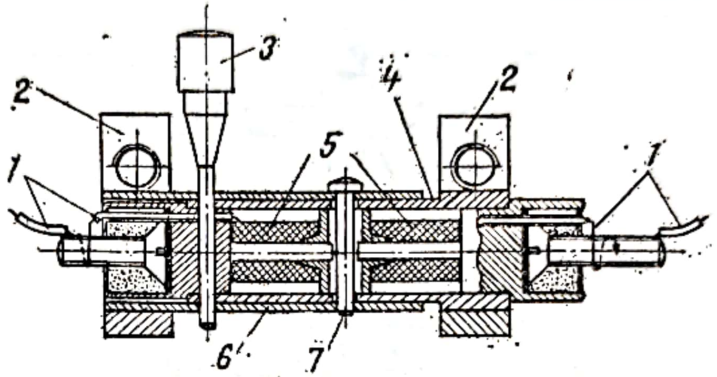
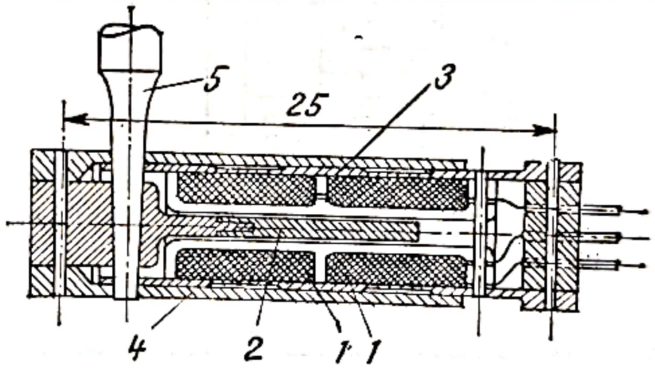
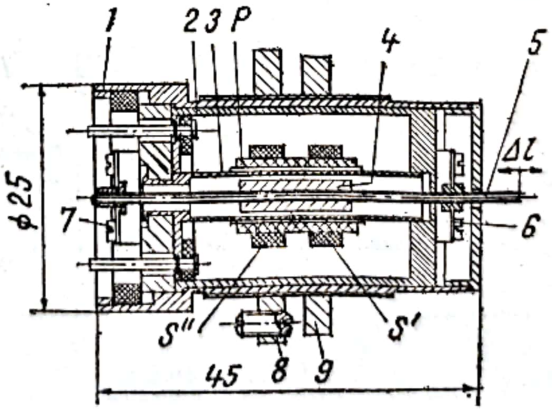
1	2	3	4	5	6
Capacitiv	fără contact cu piesa	deplasări	0—40000		*1* — inductanţă *2* — electrod *3* — ecran electrostatic *4* — piesa *5* — spre montajul intermediar
	cu contact cu piesa	deplasări forţe presiuni acceleraţii	0—25000		*1* — electrod fix *2* — placă solicitată la încovoiere *3* — piese izolatoare *4* — carcasă *5* — spre montajul intermediar
	cu armături dinţate	deplasări	0—25000		*1* — carcasă *2* — capac *3* — palpator *4* — arcuri *5* — inele izolatoare *6, 7* — tuburi dinţate *8* — inele izolatoare *9* — borne de legătură *10* — piese magnetice

Scanned with OKEN Scanner

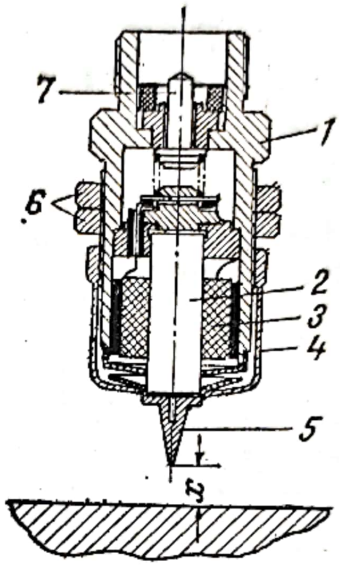
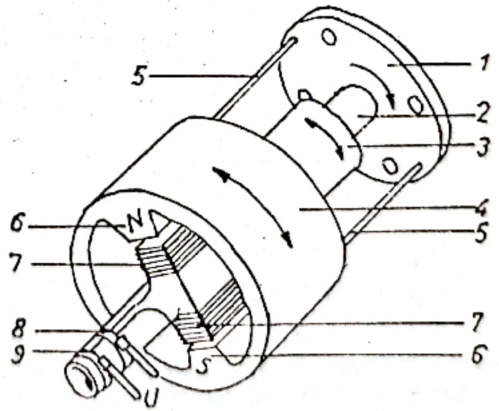
	cu dielectric mobil	deplasări	0—10000		1 — carcasă 2 — ghidaj cu bile 3 — piesă izolatoare 4 — palpator 5 — plăci ceramice 6 — plăci metalice 7 — conductoare de conexiune
Inductiv	diferenţial cu membrană	deformaţii deplasări forţe presiuni acceeraţii	1—10000		1 — bobine 2 — miezuri 3 — membrană 4 — pîrghie de transmisie 5 — gaură pentru fixare 6 — articulaţie elastică 7 — cuţite pentru măsurare

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.5 (continuare)

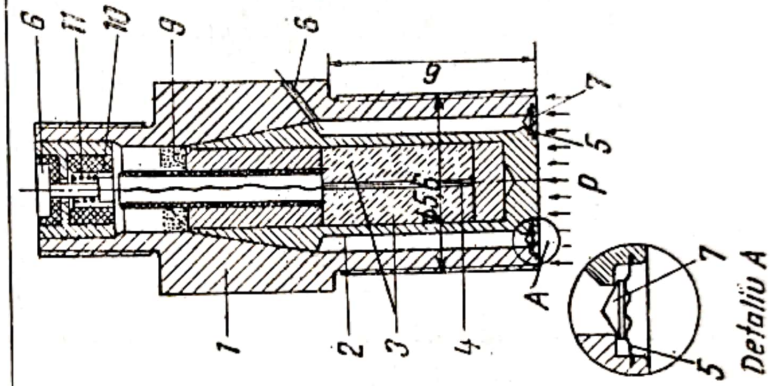
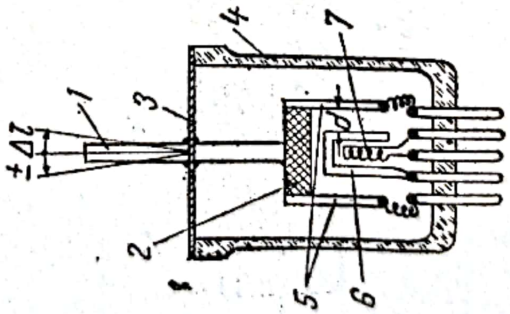
1	2	3	4	5	6
	diferenţial cu armătură transversală	deformaţii deplasări forţe presiuni acceleraţii	0—10000		*1* — conductoare de conexiune *2* — bloc de fixare *3* — ştift de blocare *4* — ţeavă din fier moale *5* — bobine *6* — ţeavă din bronz *7* — armătură transversală
Inductiv	diferenţial cu jug mobil	deplasări mari unghiuri	0—10000		*1* — bobine *2* — jug mobil *3* — ţeavă din fier moale *4* — înveliş nemagnetic *5* — ştift de blocare
Transformator	diferenţial	deplasări unghiuri	0—5000		*1* — carcasă *2* — cilindru de cupru *3* — ţeavă *4* — miez *5* — palpator *6, 7* — lagăre elastice *8, 9* — piuliţe *P* — bobină primară *S', S''* — bobine secundare

Scanned with OKEN Scanner

Cu inducție	electro-magnetic	viteze lineare	1—1000		*1* — carcasă *2* — magnet permanent *3* — bobină *4* — capac *5* — piesă conică pentru concentrarea liinilor de cimp *6* — piulițe *7* — știft pentru contact
	electrodi-namic	viteze li-neare sau unghiu-lare	1—1000		*1* — flanșă *2* — arbore *3* — lagăr *4* — masă seismică *5* — arcuri *6* — poli *7* — bobine *8, 9* — inele colectoare

Scanned with OKEN Scanner

Tabelului 3.5 (continuare)

1	2	3	4	5	6
Piezoelectric	cu cristal de cuarț	forțe presiuni accelerații	1—10000		*1* — carcasă *2* — inveliș *3* — semicilindru din cuarț *4* — electrod *5* — membrană inelară *6* — bornă *7* — corp pentru rezemare *8* — orificiu de aerisire *9* — silicagel *10* — izolație din teflon *11* — arc
Electronic	cu tub electronic	deplasări	0—100		*1* — palpator *2* — izolator *3* — membrană elastică *4* — balon de sticlă *5* — anozi *6* — catod *7* — filament pentru încălzire

Scanned with OKEN Scanner

— *scala totală la ieşire* : diferenţa algebrică între semnalele de ieşire obţinute pentru sarcina nulă şi pentru sarcina maximă;

— *semnal de ieşire* : variaţiile mărimii electrice la bornele unui captor cînd sarcina variază (tensiune, intensitate, rezistenţă, inductanţă etc.);

— *excitaţia* : forţa electromotoare a sursei de curent destinată alimentării captorului;

— *rezistenţa de intrare* : rezistenţa electrică între firele cărora li se aplică excitaţia;

— *rezistenţa de ieşire* : rezistenţa electrică între firele de legătură cu instrumentul de măsură;

— *curba de etalonare* : curba reprezentînd semnalul de ieşire funcţie de sarcina aplicată, obţinută prin aplicarea de sarcini cunoscute, luate drept etaloane;

— *rezistenţa de izolaţie* : rezistenţa electrică între circuit şi masa captorului;

— *sensibilitatea* : raportul dintre o variaţie a semnalului de ieşire şi variaţia sarcinii care l-a provocat, adică panta curbei de etalonare;

— *prag de sensibilitate* : cea mai mică variaţie a sarcinii care produce o variaţie perceptibilă a semnalului de ieşire;

— *precizia* : cea mai mică mărime care este cu certitudine superioară diferenţei dintre sarcina reală aplicată şi valoarea determinată pe curba de etalonare. Precizia se exprimă în procente faţă de sarcina nominală;

— *dezechilibrul iniţial* : semnalul de ieşire pentru o sarcină nulă;

— *deriva* : variaţiile semnalului de ieşire pentru sarcină constantă. Ea se exprimă în procente faţă de scala de ieşire, pentru un timp indefinit;

— *deriva echilibrării* : variaţiile dezechilibrului iniţial pentru un timp indefinit, în absenţa sarcinii şi a perturbaţiilor termice;

— *revenirea la zero* : diferenţa dintre semnalele de ieşire pentru sarcină nulă, înainte de aplicarea sarcinii şi după înlăturarea ei;

— *fidelitatea* : împrăştierea maximă a semnalelor de ieşire obţinute prin aplicarea repetată a aceleaşi sarcini în aceleaşi condiţii. Ea se exprimă în procente faţă de scala de ieşire;

— *liniaritatea* : diferenţa maximă dintre curba de etalonare şi dreapta ce trece prin punctele corespunzătoare sarcinii nule şi sarcinii nominale. Ea se exprimă în procente faţă de scala de ieşire pentru sarcină crescătoare;

— *histerezisul* : diferenţa maximă dintre semnalele de ieşire obţinute pentru aceeaşi sarcină aplicată mai întîi crescător, pornind de la zero şi apoi descrescător, pornind de la sarcina nominală. De regulă histerezisul se dă pentru o sarcină egală cu jumătate din sarcina nominală şi se exprimă în procente faţă de scala de ieşire;

— *eroarea combinată* (liniaritate şi histerezis) : diferenţa maximă dintre dreapta ce trece prin punctele corespunzătoate sarcinii nule şi sarcinii nominale şi curbele de etalonare obţinute pentru sarcini crescătoare şi descrescătoare. Ea se exprimă în procente faţă de scala totală la ieşire;

Scanned with OKEN Scanner

— *fluajul*: variațiile semnalului de ieșire sub sarcină în funcție de timp. El se exprimă la sarcina nominală în procente față de scala de ieșire, pentru o perioadă de timp dată;

— *fluajul rezidual*: variațiile semnalului de ieșire după anularea sarcinii. El se exprimă în procente față de scala de ieșire pentru o perioadă de timp dată;

— *deriva termică de zero*: variațiile semnalului de ieșire produse de variația temperaturii în absența sarcinii. Ea se exprimă în procente față de scala de ieșire pentru variația temperaturii cu 1°C.

Pentru fiecare captor în parte, în funcție de destinația sa, trebuie stabilite valorile optime ale caracteristicilor prezentate mai sus. Impunerea unor caracteristici prea severe duce la scumpirea excesivă a captorului, după cum acceptarea unor caracteristici cu un nivel nesatisfăcător duce la erori prea mari în procesul de măsurare.

Unele caracteristici sînt contradictorii, ca de exemplu sensibilitatea și sarcina nominală, ceea ce duce la limitarea sensibilității pentru o sarcină nominală dată și invers, pentru o sensibilitate impusă, sarcina nominală rezultă. Desigur că aceste limitări, ca și altele de acest gen, depind de tipul captorului.

Alegerea tipului captorului ca și a majorității caracteristicilor acestuia trebuie să aibă în vedere condițiile concrete în care urmează să se facă măsurarea și anume: tipul sarcinii, modul de variație al acesteia în timp, parametrii mediului ambiant, durata măsurării etc. precum și tipul aparaturii cu care urmează să se măsoare sau să se înregistreze semnalul de ieșire al captorului. O adaptare nesatisfăcătoare a caracteristicilor captorului cu cele ale aparaturii de măsurare duce la compromiterea procesului de măsurare sau la denaturarea fenomenului ce urmează să se studieze.

Unele aspecte suplimentare privind caracteristicile metrologice principale ale mijloacelor de măsurare în general, sînt date în paragraful 12.4.

3.5.3. CONDIȚIILE CE SE IMPUN CAPTOARELOR

În vederea efectuării unor măsurări corecte, captoarele trebuie alese astfel încît să fie adaptate cît mai bine condițiilor în care urmează a fi utilizate și anume:

a) *Condiții legate de tipul și modul de variație a mărimii ce se măsoară.* Pentru fiecare tip de sarcină (definită la începutul paragrafului) există mai multe tipuri constructive de captoare, limitările impuse fiind relativ reduse, așa cum rezultă și din tabelul 3.5. Astfel captoarele rezistive sau piezoelectrice nu pot fi folosite pentru măsurarea vitezelor; captoarele rezistive cu traductoare nelipite nu funcționează corect pentru variații mari ale sarcinii, unele captoare inductive au abateri mari de liniaritate pentru valori importante ale sarcinii nominale, etc.

Mărimile care se măsoară pot avea valori staționare sau variații lente în timp (sub 3 Hz), caz în care se numesc mărimi statice sau cvasistatice, pot avea variații periodice ca în cazul vibrațiilor sau pot fi șocuri la care variații relativ mari se produc într-un interval de timp foarte scurt.

Scanned with OKEN Scanner

Alegerea tipului de captor este determinată, în unele cazuri, de modul de variaţie în timp a sarcinii. De exemplu captoarele piezoelectrice sau seismice nu se utilizează pentru măsurări statice. Pentru măsurări de vibraţii sau şocuri există limitări ale domeniului de frecvenţe impuse de frecvenţa oscilaţiilor proprii libere ale captorului şi de factorul de amortizare al acestora [10], [13]. De asemenea, captoarele nu pot fi utilizate corect la frecvenţe pentru care au loc fenomene de rezonanţă în unele componente ale lor ca arcuri, carcase, pîrghii etc.

La proiectarea sau alegerea unui captor trebuie estimată eventualitatea ca mărimea ce se măsoară să aibă variaţii ale direcţiei şi eventual ale punctului de aplicaţie, caz în care se vor impune captorului condiţii corespunzătoare privind sensibilitatea transversală şi limitarea influenţei variaţiei semnalului de ieşire cînd se schimbă punctul de aplicaţie al sarcinii. La fel de importantă este şi protejarea captorului împotriva unor suprasolicitări care pot avea loc în timpul măsurării sau al unor operaţii auxiliare de montaj, transport etc. Pentru aceasta captorul va avea sisteme de protecţie sau blocaj corespunzătoare, etc. Suprasolicitarea captorului poate duce la deteriorarea sa, la dereglări sau modificări ale curbei de etalonare, caz în care se impune reetalonarea sa.

În numeroase cazuri captoarele sînt implantate în sisteme complexe de măsurare, reglare, protecţie şi semnalizare, situaţii în care ele trebuie să funcţioneze neîntrerupt luni sau ani. În asemenea cazuri este imposibilă verificarea, reglarea şi etalonarea periodică a captorului, ceea ce are drept consecinţă impunerea unor condiţii corespunzătoare privind siguranţa în funcţionare şi stabilitatea caracteristicilor sale pe perioada de timp respectivă.

b) *Condiţii legate de starea mediului înconjurător.* Adeseori captoarele trebuie să lucreze în condiţii de mediu nefavorabile ca : umiditate excesivă (sau chiar imersare sub apă), temperaturi ridicate, presiuni hidrostatice mari, existenţa unor agenţi corosivi sau a unui cîmp magnetic, electric etc. În astfel de situaţii este necesară adoptarea unor măsuri de protecţie a captorului prin utilizarea unor carcase etanşe, ecrane de protecţie, etc. care să împiedice acţiunea asupra captorului a agentului de mediu nefavorabil. De asemenea se pot folosi captoare fără contact, de tip capacitiv, inductiv, fotoelectric etc., care să permită folosirea acestora la o distanţă suficient de mare faţă de punctul de măsurare astfel încît să funcţioneze în condiţii normale.

În cazurile în care astfel de măsuri nu sînt posibile sau sînt numai parţial eficiente, trebuie ca proiectarea sau alegerea captorului şi a cablurilor de legătură să se facă astfel încît acesta să funcţioneze corect în condiţiile impuse.

Protejarea împotriva umidităţii se face utilizînd materiale speciale care asigură izolarea mecanică şi electrică corespunzătoare a traductoarelor, cablurilor şi tuturor părţilor electrice [8], [13], [24]. Modul de aplicare a acestora şi domeniul de utilizare sînt precizate în prospectul fabricii. Părţile mecanice ale captorului se protejează prin acoperiri chimice sau galvanice. De regulă protecţia împotriva umidităţii este eficientă şi împotriva coroziunii.

Scanned with OKEN Scanner

Utilizarea la temperaturi ridicate a captoarelor impune folosirea unor materiale care să aibă caracteristici mecanice şi electrice satisfăcătoare la temperatura respectivă.

Se ştie că limita de elasticitate, limita de curgere, modulul de elasticitate, etc. ale unui material metalic se micşorează cu creşterea temperaturii. De asemenea rezistenţa de izolaţie a bobinelor, cablurilor şi a celorlalte elemente electrice ale captorului scad cu temperatura. Variază cu temperatura şi caracteristicile materialelor elementelor sensibile ale traductoarelor ca de exemplu cele rezistive, piezoelectrice, piezorezistive, etc., ceea ce duce la modificarea sensibilităţii acestora. Traductoarele capacitive şi inductive sînt mai puţin sensibile la variaţii mici de temperatură decît cele rezistive sau piezoelectrice.

Efectuarea de măsurări la temperaturi ridicate duce la apariţia a numeroase surse de erori, chiar în condiţiile utilizării unor materiale de calitate satisfăcătoare [15], ceea ce impune studiul acestora pentru fiecare situaţie concretă în parte.

Variaţiile tranzitorii ale temperaturii duc la lungiri sau scurtări inegale ale elementelor mecanice ale captoarelor ceea ce provoacă variaţii ale jocurilor, forţelor de frecare, eforturilor de prestrîngere în elementele elastice, etc. De asemenea, în elementele electrice se produc modificări ale rezistivităţii, constantelor dielectrice, etc. sau pot apare efecte piroelectrice (pentru materialele piezoelectrice [13]). Consecinţa globală a acestor fenomene este modificarea caracteristicilor captorului în cauză. Utilizarea acestuia fără considerarea corecţiilor corespunzătoare condiţiilor reale în care a funcţionat poate duce la erori de măsurare foarte mari. Ori de cîte ori este posibil se va face o etalonare a captorului în condiţii cît mai apropiate de cele în care urmează să se efectueze măsurarea.

Efectele unei presiuni hidrostatice mari asupra captoarelor se manifestă prin apariţia de solicitări mecanice suplimentare în elementele mecanice ale acestora şi prin modificarea semnalelor de ieşire ale traductoarelor ce intră în componenţa captoarelor respective ca urmare a unor deformaţii suplimentare ale elementelor sensibile sau ale modificărilor constantelor de sensibilitate [14], [28].

Efectul presiunii este funcţie de tipul şi construcţia captorului şi mai ales de tipul şi caracteristicile traductoarelor utilizate.

Efectele unui cîmp de radiaţii nucleare (neutroni şi raze gama) sînt legate de modificări ale rezistenţei electrice a elementului sensibil al traductorului precum şi de reducerea rezistenţei de izolaţie.

Efectele zgomotelor de mare intensitate ce se produc în timpul unei măsurări pot fi foarte importante mai ales în cazul măsurărilor de vibraţii. Excitaţia acustică poate influenţa semnalul unui accelerometru prin antrenarea în mişcare a elementului sensibil al acestuia [13]. În astfel de situaţii este necesară izolarea fonică a captorului, mărirea frecvenţei de rezonanţă (în cazul unui accelerometru) şi mărirea factorului de amortizare al captorului.

c) *Condiţii constructive, tehnologice şi de materiale. Dimensiunile de gabarit* şi greutatea unui captor pot constitui factori determinanţi în proiectarea sau alegerea sa, ca urmare a lipsei de spaţiu în zona punctului

Scanned with OKEN Scanner

de măsurare sau a modificării caracteristicilor sistemului ce se studiază prin adăugarea unei mase mari (de exemplu în măsurările de vibrații). De regulă, reducerea dimensiunilor unui captor se face pe seama micșorării sensibilității sale [13]. Greutatea și dimensiunile unui captor depind în mare măsură de tipul acestuia, de soluțiile constructive adoptate și de materialele utilizate. De exemplu un accelerometru piezoelectric este mai mic decît unul inductiv ; un captor de forțe rezistiv este mai mic dacă elementul elastic este o bară solicitată la întindere, decît dacă acesta este o grindă sau un inel solicitate la încovoiere. În cazul utilizării unor oțeluri cu limită de elasticitate ridicată dimensiunile elementului elastic pot fi mai mici. De asemenea greutatea și dimensiunile unui captor sînt mai mici dacă se utilizează materiale electrice, magnetice, piezoelectrice, de izolație etc., de calitate superioară. Acestea duc însă la mărirea prețului de cost.

Rigiditatea elementului elastic al captorului (pentru tipurile de captoare cu element elastic) și a captorului în ansamblu este o caracteristică constructivă ce trebuie corect estimată, astfel încît să nu aibă loc modificări sensibile ale parametrilor sistemului mecanic ce se studiază, mai ales în cazul măsurărilor de vibrații și a celor dinamice în general, la care captorul se montează în serie sau în paralel cu sistemul mecanic, prin aceasta realizîndu-se un ansamblu în care cele două componente mecanice se influențează reciproc. Este necesară o analiză critică amănunțită a montajului pentru a aprecia în ce condiții prezența captorului produce modificări neglijabile ale valorilor parametrilor ce urmează să se măsoare. În această analiză este necesară cunoașterea rigidității captorului sau a constantei sale elastice k, definită ca valoare a sarcinii pentru care captorul are o deformație egală cu unitatea.

Pentru unele tipuri de elemente elastice ale captoarelor se dau în tabelul 3.6 formulele de calcul pentru constantele elastice k corespunzătoare [22]. De asemenea se dau și expresiile valorilor deformațiilor specifice ε în diverse puncte și pe diverse direcții ale elementelor elastice. Cu aceste expresii se pot stabili sensibilitățile captoarelor respective și se pot dimensiona elementele elastice pentru o anumită valoare a sarcinii nominale, dacă se cunosc modulul de elasticitate și rezistența admisibilă a materialului.

Forma elementului elastic al captorului trebuie astfel proiectată încît [13]:

— să existe spațiu suficient pentru lipirea traductoarelor (în cazul captoarelor rezistive), amplasarea fiind de preferat în zone în care gradientul tensiunilor este zero sau aproape zero, iar duritatea suprafeței cît mai mare ;

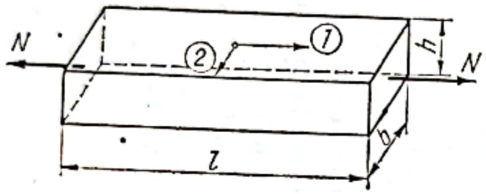
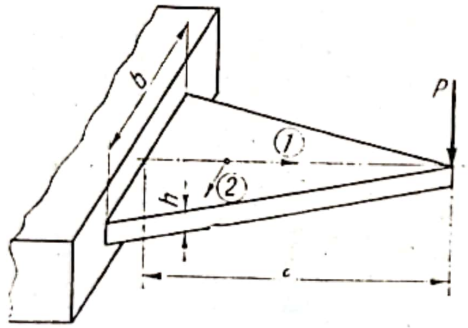
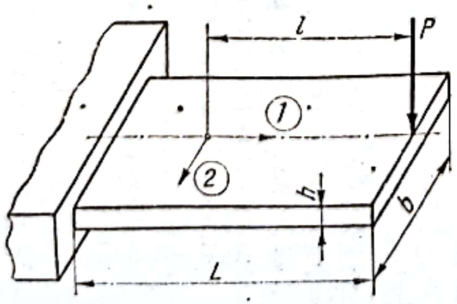
— captorul să aibă în final frecvența proprie dorită ;

— să aibă loc deformații în traductoare care să fie suficient de mari la valorile mici ale sarcinii măsurate, pentru ca semnalul obținut să poată fi citit sau înregistrat cu suficientă precizie, dar nu atît de mari încît să ducă la neliniarități sau la scurtarea duratei de utilizare a traductoarelor ;

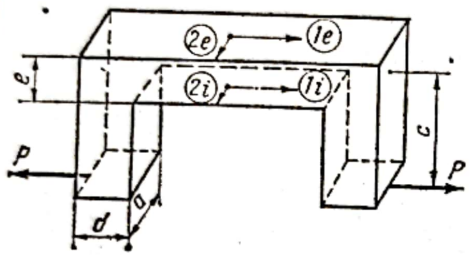
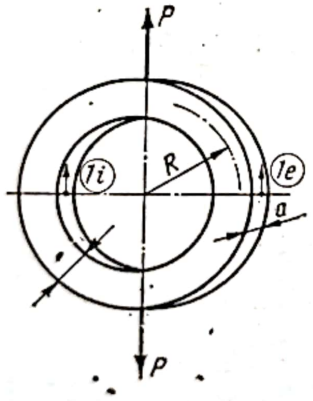
— să permită o compensare a efectului temperaturii și eventual o amplificare a semnalului în cazul cînd acest lucru este posibil ;

Scanned with OKEN Scanner

Relaţii pentru calculul elementelor elastice ale captoarelor *Tabelul 3.6*

Tipul elementului elastic	Schiţa, notaţii	Deformaţiile specifice ε	Constanta elastică k
Tijă solicitată axial		$\varepsilon_1 = \frac{N}{Ebh}$; $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$	$k = \frac{Ebh}{l}$
Bară de egală rezistenţă la încovoiere		$\varepsilon_1 = \frac{6Pl}{Ebh^2}$; $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$	$k = \frac{Ebh^3}{6l^3}$
Bară în consolă solicitată la încovoiere		$\varepsilon_1 = \frac{6Pl}{Ebh^2}$; $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$	$k = \frac{Ebh^3}{4L^3}$

Scanned with OKEN Scanner

Jug solicitat la încovoiere		$\varepsilon_{1i} = \frac{P}{Eae}\left(\frac{6c}{e} + 1\right)$; $\varepsilon_{2i} = -\mu\varepsilon_{1i}$ $\varepsilon_{1e} = -\frac{P}{Eae}\left(\frac{6c}{e} - 1\right)$; $\varepsilon_{2e} = -\mu\varepsilon_{1e}$	$k = \frac{Ea}{4c^2\left(\frac{2c}{d^3} + \frac{3b}{e^3}\right)}$
Inel circular		$\varepsilon_{1e} = \frac{P}{2Eae}\left[1 - \frac{3R}{e}\left(1 - \frac{2}{\pi}\right)\right]$ $\varepsilon_{1i} = \frac{P}{2Eae}\left[1 + \frac{3R}{e}\left(1 - \frac{2}{\pi}\right)\right]$	$k = \frac{Eae^3}{12\left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi}\right)R^3}$

Observaţie: În tabel s-au utilizat notaţiile: E pentru modulul de elasticitate longitudinal şi μ pentru coeficientul de contracţie transversală.

Scanned with OKEN Scanner

— să permită o aplicare uşoară a traductoarelor şi a firelor de legătură şi, dacă este necesar, protecţia traductoarelor.

La alegerea traductoarelor rezistive utilizate în construcţia diverselor captoare se va ţine seama ca [23]:

— baza, respectiv rezistenţa electrică să fie cît mai mare posibilă;
— să funcţioneze corect şi sigur în domeniul de temperatură impus;
— traductoarele pereche să aibă aceleaşi caracteristici;
— să prezinte o bună compensare a derivei echilibrării şi a variaţiei constantei de sensibilitate cu temperatura;
— conductorii de legătură să aibă o bună rezistenţă mecanică şi să permită efectuarea unor conexiuni solide prin lipire cu cositor şi aliajele lui.

Pentru utilizări curente cele mai indicate sînt traductoarele cu fir de constantan, cu suport fenolic sau epoxidic, lipite cu adezivi adecvaţi (v. § 3.2).

Existenţa unei mişcări relative de rotaţie sau translaţie a captorului faţă de aparatura de măsurare impune utilizarea unor soluţii constructive

Tabelul 3.7

Contactoare rotative cu perii şi inele colectoare

Inelele		Periile	
Materialul	Duritatea Vickers HV	Materialul	Presiunea contact daN/cm²
Tablă de alamă	116	Argint grafitat	6,3
Tablă de alamă	116	Cupru grafitat	8,8
Tablă de alamă, sablată cu alice	161	Argint grafitat	5,6
Lamelă de alamă	139	Cupru grafitat	10,5
Lamelă de alamă	139	Cărbune moale	12
Lamelă de alamă	139	Cărbune dur	10,5
Lamelă de alamă	150	Argint grafitat	6,7
Argint placat	—	Cărbune moale	6,7
Argint placat	—	Cărbune dur	6,7
Monel	124	Argint grafitat	6,7
Monel	124	Cupru grafitat	8,8
Monel	124	Cărbune dur	15,8
Inconel	181	Argint grafitat	7
Inconel	181	Cupru grafitat	8,8
Inconel	181	Cărbune moale	14
Oţel inoxidabil	185	Argint grafitat	7

Observaţie:
— Aliajul denumit argint grafitat conţine 60% argint în volum;
— Aliajul denumit cupru grafitat conţine 50% cupru în volum.

adecvate care să permită transmiterea în bune condiţii a semnalului de ieşire al captorului la aparatură.

În cazul mişcărilor de rotaţie se utilizează *contactori rotativi* cu perii şi inele colectoare. Buna funcţionare a acestora depinde de: materialul inelelor, duritatea superficială a acestora, materialul periilor şi de presiunea de contact dintre perii şi inele. În tabelul 3.7 se dau unele detalii privind contactoarele rotative cu frecare uscată [24].

Scanned with OKEN Scanner

Cînd contactorul lucrează într-un mediu cu ulei se obţin rezultate bune dacă inelele sînt de alamă iar periile de argint grafitat (60% argint în volum) presiunea de contact fiind 12 daN/cm² [13].

În cazul vitezelor mari este foarte important ca excentricitatea inelelor să fie cît mai mică şi valoarea maximă a acesteia să nu depăşească 8 μm.

Pentru reducerea zgomotului introdus de contactorul rotativ în circuitul electric de măsurare se utilizează mai multe perii pentru fiecare inel şi scheme electrice adecvate pentru reducerea efectelor variaţiilor rezistenţelor de contact. În figura 3.28 se prezintă o astfel de schemă [24] utilizată pentru un circuit de măsurare format din patru traductoare rezistive conectate în punte completă. Schema este destinată măsurărilor statice sau cvasistatice şi include un sistem automat de echilibrare.

În cazul mişcărilor oscilante se utilizează contactoare cu contacte de translaţie. În aceste cazuri este foarte des posibil să se monteze cablurile de legătură aşa fel încît să nu mai fie necesare contacte alunecătoare. Pentru aceasta se utilizează sisteme de pîrghii articulate care să urmărească deplasarea captorului şi să poarte în acelaşi timp şi cablurile. La fiecare

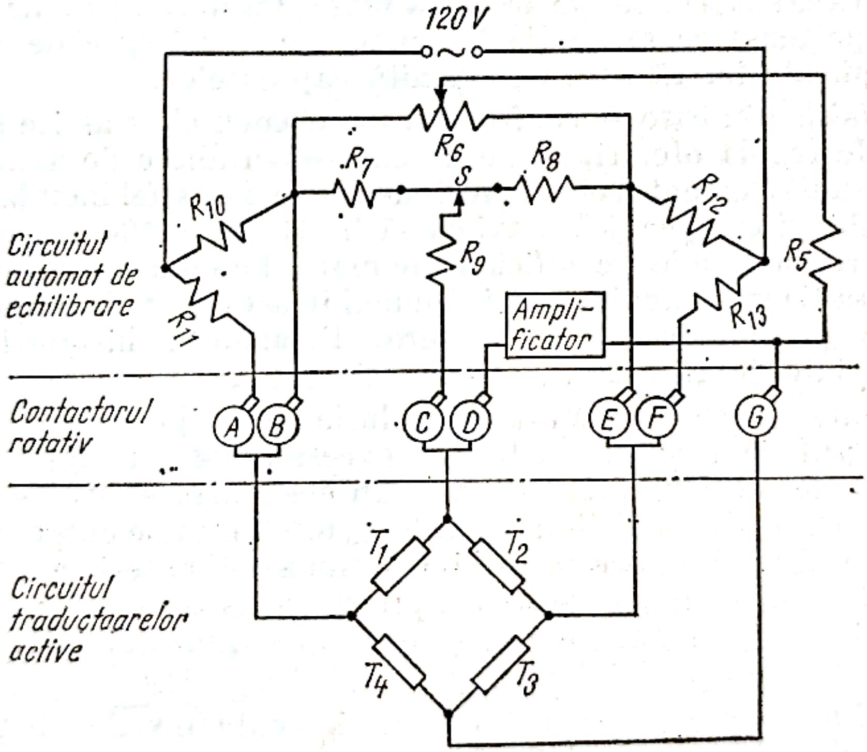


Fig. 3.28.

articulaţie cablurile trebuie să aibă una sau mai multe bucle pentru prevenirea ruperii prin oboseală a conductorilor electrici.

Conductoarele de legătură dintre captor şi aparatura de măsurare trebuie alese ţinînd seama de o serie de factori [13].

Atunci cînd captorul se utilizează într-un sistem de măsurare cu frecvenţă purtătoare conductoarele pot introduce un efect de reactanţă.

Scanned with OKEN Scanner

Variaţiile de reactanţă ale conductoarelor în timpul măsurării deformează semnalul ce se transmite şi micşorează sensibilitatea procesului de măsurare.

În cazul captoarelor cu traductoare piezoelectrice conductorul introduce la bornele de ieşire ale captorului o capacitate suplimentară *de şuntare* care reduce sensibilitatea acestuia.

Pentru măsurări la care sînt necesare conductoare de lungimi mari sînt indicate captoarele inductive, care avînd impedanţă electrică mică tensiunile de ieşire nu sînt mult influenţate de lungimea cablului utilizat.

Rezistenţa electrică a conductoarelor folosite pentru captoare rezistive trebuie să fie cît mai mică, sensibilitatea măsurării fiind funcţie de raportul dintre rezistenţa traductorului şi suma rezistenţelor traductorului şi conductorului.

Rezistenţa de izolaţie a conductorului trebuie să fie la fel de mare sauchiar mai mare decît cea a traductoarelor ce intră în compunerea captorului şi a acestuia în ansamblu. Izolaţia conductoarelor trebuie să ofere, la nevoie, o protecţie contra umidităţii. Atunci cînd se folosesc cabluri ecranate trebuie ca mantaua de ecranare să aibă o acoperire izolatoare şi doar un capăt al său să fie legat la masă. Cablurile trebuie fixate din loc în loc pe piesa ce se studiază sau pe suporturi speciale astfel încît sarcinile aplicate lor să nu se transmită captoarelor.

Materialele din care se confecţionează elementele elastice ale captoarelor sînt de regulă oţeluri, aliaje de cupru sau aliaje de aluminiu [33]. În mod obişnuit elementul elastic se dimensionează astfel încît la solicitarea nominală alungirea specifică maximă să fie 1000 — 1500 μm/m, pentru a asigura un semnal de ieşire suficient de mare. Pe de altă parte trebuie ca solicitarea să fie în domeniul elastic, numai în acest caz obţinîndu-se valori acceptabile pentru revenirea la zero, liniaritate, histerezis, eroarea combinată şi fluajul rezidual.

În esenţă trebuie adoptată o soluţie de mijloc între un semnal de ieşire insuficient şi un histerezis excesiv. Nu este ieşit din comun ca tensiunea (efortul unitar) maximă din elementul elastic al captorului sub sarcina nominală să fie limitată la 30 % din limita de curgere a materialului utilizat [24]. Din aceste motive se folosesc materiale cu rezistenţă la rupere ridicată şi histeresis redus, precum şi cele pentru care variaţiile temperaturii în domeniul de funcţionare al captorului influenţează neglijabil modulul de elasticitate.

Condiţiile tehnologice generale ce trebuie avute în vedere la proiectarea, fabricarea şi repararea unui captor sînt cele utilizate în mecanica fină şi în special în domeniul aparatelor de măsură. Drept consecinţă firească a marii varietăţi de tipuri şi dimensiuni ale captoarelor, destinate măsurării mărimilor mecanice, precum şi a utilizării materialelor celor mai diverse, se întîlnesc numeroase procese tehnologice speciale în acest domeniu. Exemple în acest sens sînt prelucrările cristalelor şi materialelor piezoelectrice, piezorezistive, semiconductoare, magnetostrictive etc., procesele chimice privind adezivii, materialele de protecţie şi izolaţie etc., operaţiile de asamblare ale traductoarelor rezistive şi multe altele.

Scanned with OKEN Scanner

În tabelul 3.5 s-au prezentat principalele tipuri de captoare ce se utilizează pentru măsurarea mărimilor mecanice cu scopul de a se oferi o imagine de ansamblu. În cele ce urmează se prezintă unele detalii constructive, de calcul, proiectare și utilizare pentru cîteva captoare, grupate după tipul mărimii ce se măsoară. Toate acestea trebuie privite ca exemplificări ale principiilor generale expuse anterior și nicidecum ca o prezentare exhaustivă. Selecția s-a oprit asupra captoarelor mai des folosite și anume : rezistive (cu traductoare rezistive), inductive, capacitive și piezoelectrice, ponderea cea mai mare avînd-o cele de primul tip.

a) Captoare pentru măsurarea deplasărilor. Cel mai simplu captor pentru măsurarea deplasărilor sau deformațiilor este o lamelă de grosime constantă avînd forma unui solid de egală rezistență la încovoiere (v.

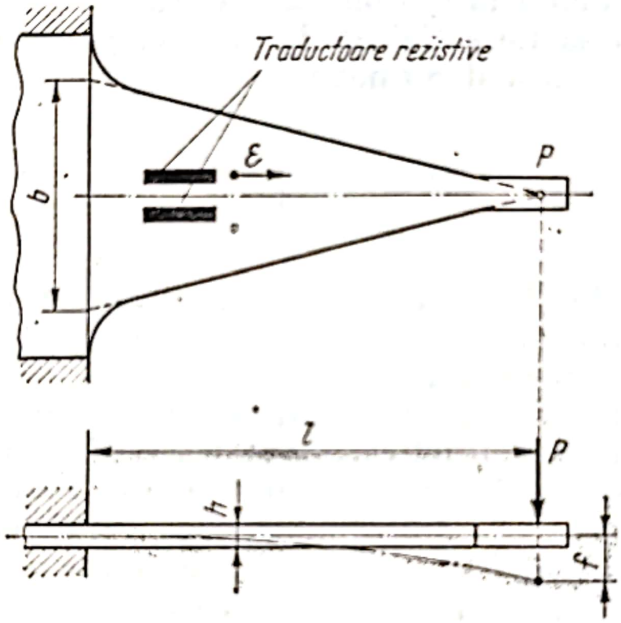


Fig. 3.29.

tabelul 3.6) pe care se lipesc *1*, *2* sau *4* traductoare rezistive. Cu notațiile din figura 3.29 săgeata în secțiunea de aplicare a forței este

$$f = \frac{Pl^3}{2EI_{z_0}}, \tag{3.47}$$

în care I_{z_0} este momentul de inerție axial al lamelei pentru secțiunea din încastrare.

Tensiunea normală maximă, în oricare secțiune a lamelei, este

$$\sigma_{max} = \frac{6\,Pl}{b\,h^2} \tag{3.48}$$

Scanned with OKEN Scanner

Avînd în vedere că $\sigma = \varepsilon E$, din relaţiile (3.47) şi (3.48) rezultă

$$\varepsilon = \frac{fh}{l^2}, \tag{3.49}$$

formulă cu care se poate dimensiona lamela pentru măsurarea unei săgeţi f cu o anumită sensibilitate ε, corespunzătoare unui singur traductor activ.

Trebuie remarcat faptul că în relaţia (3.48) nu intervine lăţimea b a lamelei, modulul de elasticitate al materialului E şi nici poziţia traductoarelor din lungul lamelei.

Dimensiunile lamelei se vor alege astfel încît în timpul funcţionării săgeata să nu depăşească valoarea maximă

$$f_{max} = \frac{\sigma_a l^2}{Eh} \tag{3.50}$$

în care σ_a este rezistenţa admisibilă a materialului, stabilită astfel încît histerezisul acestuia să fie suficient de mic (v. § 3.5, c).

Pentru ca lamela să se deformeze cu săgeata f, trebuie aplicată asupra ei forţa

$$P = \frac{Efb}{6}\left(\frac{h}{l}\right)^3 \tag{3.51}$$

Deoarece relaţiile (3.49) şi (3.51) sînt liniare în raport cu ε, f şi P rezultă că acestea rămîn valabile şi dacă în ele se introduc, în loc de valorile respective, variaţiile acestora.

Un astfel de captor se poate folosi pentru măsurări statice sau dinamice, în acest ultim caz fiind necesară verificarea frecvenţei proprii a captorului, în vederea evitării unor fenomene de rezonanţă.

În figura 3.30 s-a reprezentat un captor cu traductoare rezistive care prin forma şi destinaţia sa seamănă cu extensometrele mecanice [9]. Corpul *1* al captorului prin cele două picioruşe ascuţite urmăreşte deformaţiile piesei. Ca urmare a variaţiei distanţei de 30 mm ce reprezintă baza captorului, lamela *2* produce o încovoiere a lamelei elastice *3* pe care sînt montate traductoarele rezistive *4* şi *5*.

Pentru măsurări ale unor stări plane de deformaţii specifice s-au imaginat captoare [4] de genul celui prezentat în figura 3.31, a. Pe un inel elastic *1* sînt lipite trei ştifturi ascuţite *2* care sînt fixate la partea superioară în suportul *3*, avînd forma unei rozete triunghiulare. Corpul *4* al captorului se prinde cu ventuza de cauciuc *5* pe suprafaţa piesei *6* ale cărei deformaţii urmează să se măsoare. Cu ajutorul şurubului *7* şi al rondelei *8* ansamblul inel-ştifturi-suport se apasă pe suprafaţa piesei astfel încît vîrfurile ascuţite ale ştifturilor să urmărească deformaţiile piesei *6*, care se transmit inelului *1* pe care sînt montate trei perechi de traductoare rezistive *9*, *10*. Pentru protejarea mecanică a elementului sensibil al captorului şi a traductoarelor s-a prevăzut discul circular *11*.

Scanned with OKEN Scanner

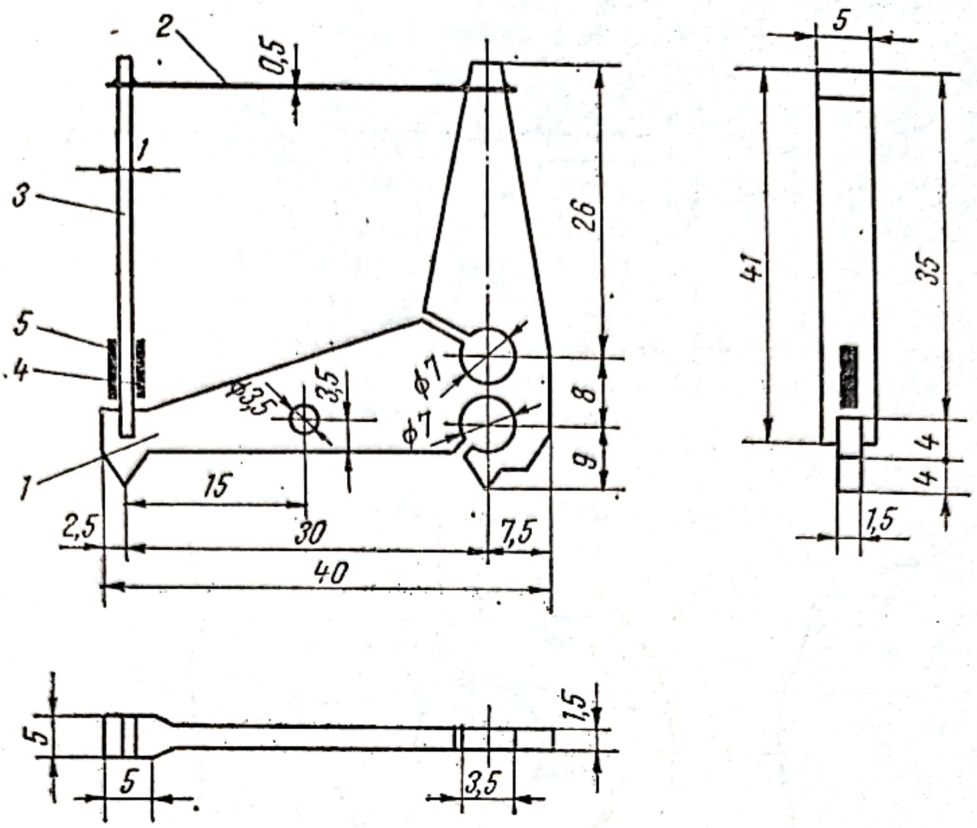


Fig. 3.30.

Din punctul de vedere al măsurării, captorul este echivalent cu o rozetă triunghiulară ca în figura 3.31, b a cărei sensibilitate se determină prin etalonare.

Avantajele cele mai importante ale unui astfel de captor sînt:

— prin alegerea corespunzătoare a materialului inelului și a dimensiunilor sale se pot măsura deformații avînd orice mărime;

— preț de cost moderat;

— montajul în vederea măsurării se face foarte simplu într-un timp foarte scurt;

— traductoarele nu au contact direct cu piesa ce se studiază, ceea ce elimină necesitatea curățirii suprafeței piesei. Dacă captorul este izolat printr-un ecran față de piesa ce se studiază astfel încît să nu poată fi încălzit prin convecție sau radiație, se poate utiliza pentru măsurări la temperaturi ridicate. Transmiterea căldurii de la piesă la cuptor prin conductivitate este foarte redusă.

Dezavantajele captorului sînt:

— nu poate fi utilizat pentru măsurări pe suprafețe concave sau convexe ale căror curbură principală este de ordinul de mărime al curburii inelului;

— ocupă spațiu mai mare decît o rozetă obișnuită;

— dacă coeficientul de dilatare termică liniară al inelului captorului este diferit de cel al piesei pe care acestea se montează, trebuie făcută o

Scanned with OKEN Scanner

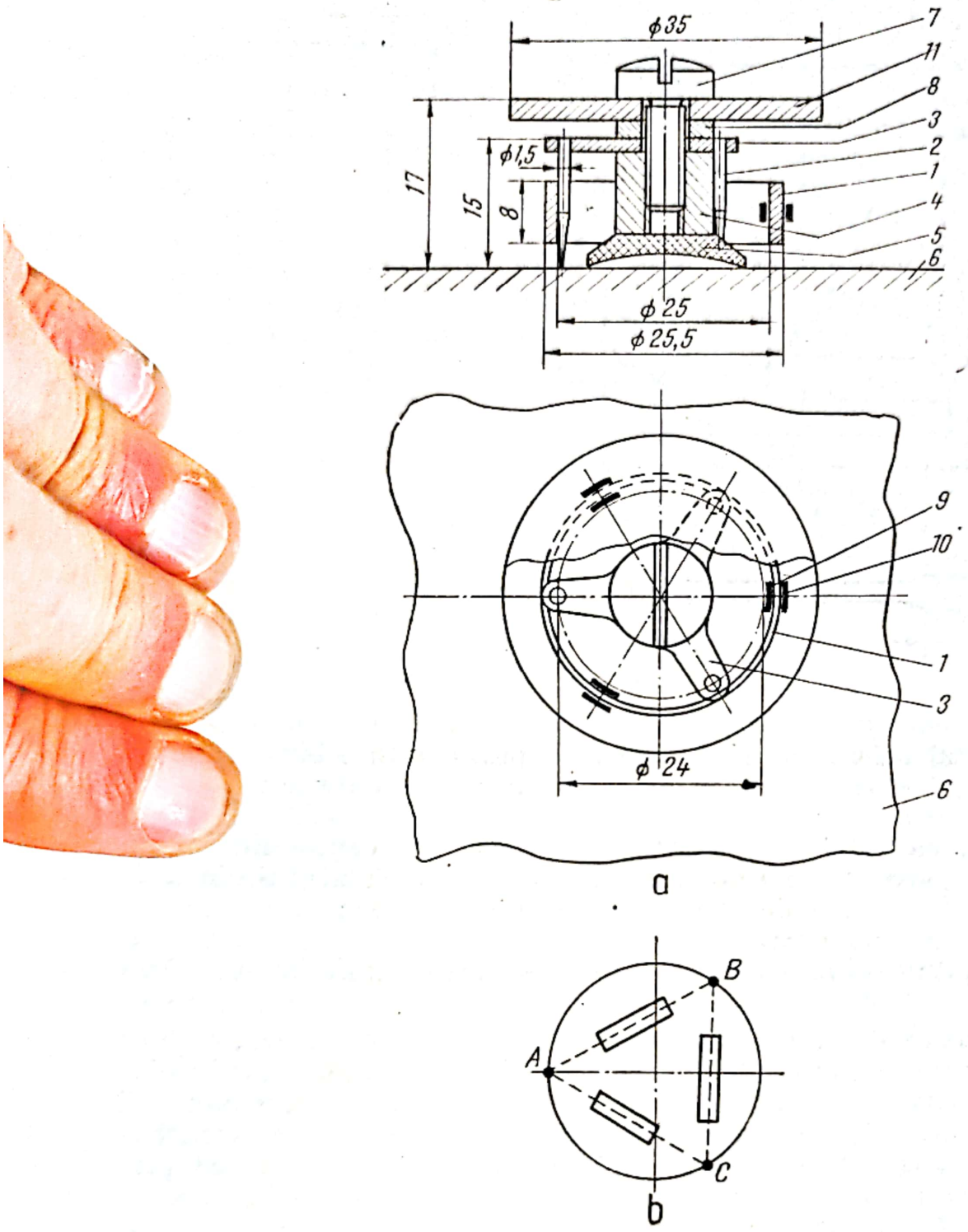


Fig. 3.31.

corecţie a semnalului de ieşire al captorului corespunzătoare variaţiei de temperatură din timpul măsurării.

Foarte des se utilizează pentru măsurarea deplasărilor captoare inductive cu reluctanţă variabilă, care funcţionează prin varierea mărimii

Scanned with OKEN Scanner

întrefierului unui electromagnet. Aceste captoare au dimensiuni mici, construcție simplă și preț de cost redus. Ele nu vin în contact cu obiectul a cărui deplasare se măsoară ceea ce elimină influența masei captorului asupra funcționării sistemului ce se studiază și elimină necesitatea utilizării unor contactori rotativi sau liniari.

Liniaritatea acestor captoare este satisfăcătoare dacă deplasarea maximă ce se măsoară este de cel mult a patra parte din mărimea întrefierului [13]. Pe de altă parte semnalul de ieșire crește dacă întrefierul se micșorează.

Dacă se montează două bobine identice în semipunte, sensibilitatea captorului crește iar linearitatea se îmbunătățește considerabil.

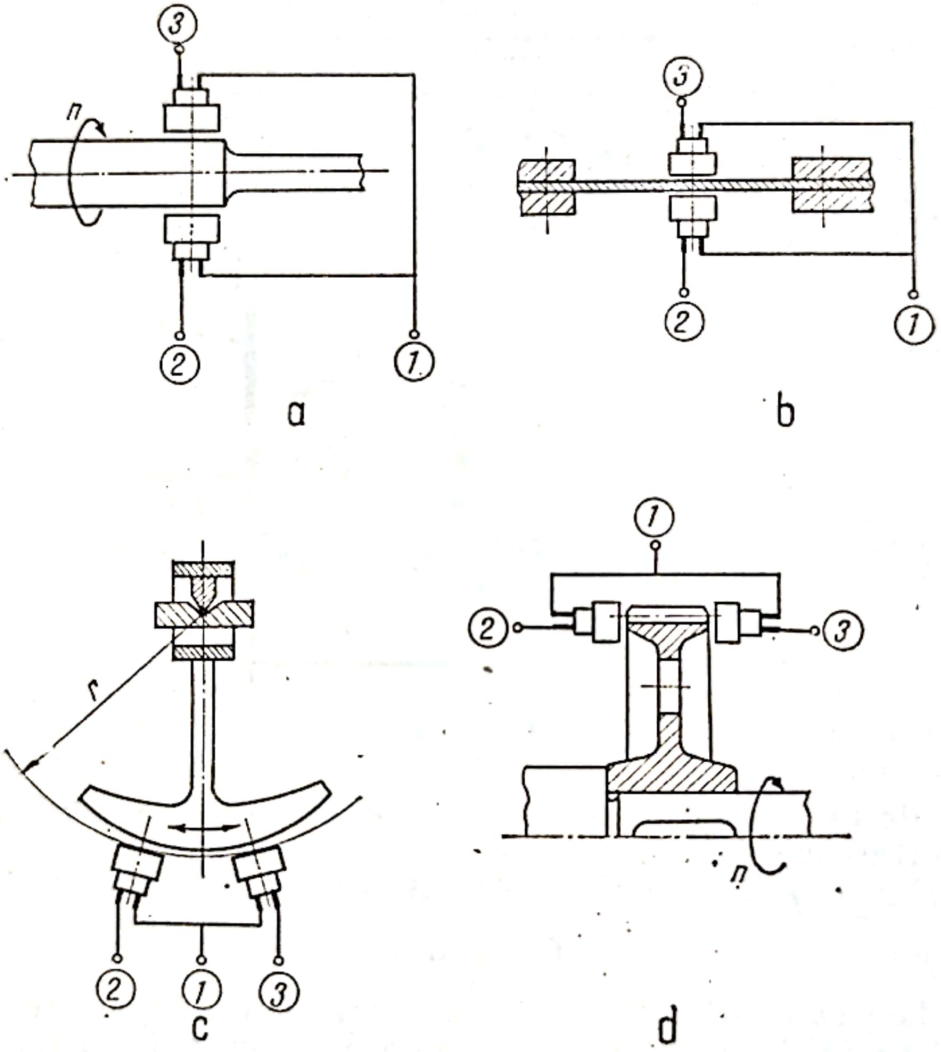


Fig. 3.32.

În mod obișnuit cu aceste captoare se pot măsura deplasări începînd de la 0,1 μm pînă la cîțiva zeci de mm, la temperaturi de pînă la 90°C [19].

În figura 3.32 s-au reprezentat schematic cîteva exemple de utilizare a unor astfel de captoare și anume pentru :

Scanned with OKEN Scanner

— măsurarea vibraţiilor transversale ale unui arbore aflat în mişcare de rotaţie (fig. 3.32,a);

— determinarea deplasărilor unei membrane foarte subţiri (fig. 3.32,b);

— studierea ocilaţiilor unui pendul (fig. 3.32, c);

— determinarea bătăii axiale a unei roţi dinţate (fig. 3.32,d).

Dacă obiectul a cărui deplasare trebuie măsurată este nemetalic, este suficient să se lipească pe el o plăcuţă subţire de oţel.

b) *Captoare pentru măsurarea rotirilor.* În fig. 3.33 s-a reprezentat schema constructivă a unui captor cu traductoare rezistive pentru măsurarea unghiurilor [27]. Pe tija *1*, al cărei unghi de rotire α urmează să se măsoare, se înfăşoară cablul elastic subţire *2*, care produce săgeata *f*,

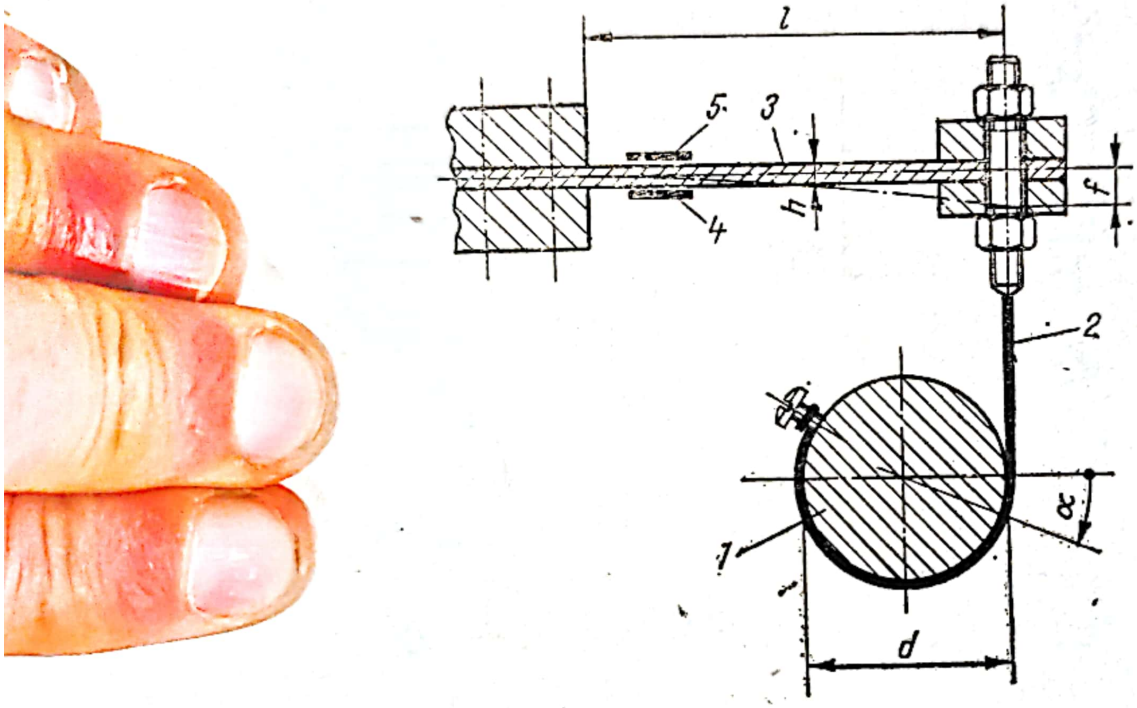


Fig. 3.33.

în capătul de prindere al lamelei elastice *3*, pe care sînt lipite traductoarele rezistive *4* şi *5*.

Între săgeata *f* şi unghiul α (măsurat în radiani) există relaţia

$$f = \alpha\, d. \tag{3.52}$$

Dacă lamela elastică 3 are forma unui solid de egală rezistenţă la încovoiere, ca în figura 3.29, atunci, înlocuind expresia (3.52) în (3.49), rezultă

$$\varepsilon = \alpha \frac{dh}{l^2}, \tag{3.53}$$

relaţie din care rezultă sensibilitatea captorului pentru un singur traductor activ. În lucrarea [27] se precizează că utilizînd patru traductoare active, sensibilitatea obţinută a fost de 0,01°.

Scanned with OKEN Scanner

Un captor inductiv de tip cu transformator diferențial se prezintă în figura 3.34, după lucrarea [25]. Captorul măsoară unghiul cu care se rotește în raport cu carcasa *1*, arborele *2*, de care este prins solidar discul semicircular *3*, confecționat din material paramagnetic. De o parte a discului *3* se află bobina *4*, care este primarul transformatorului dife-

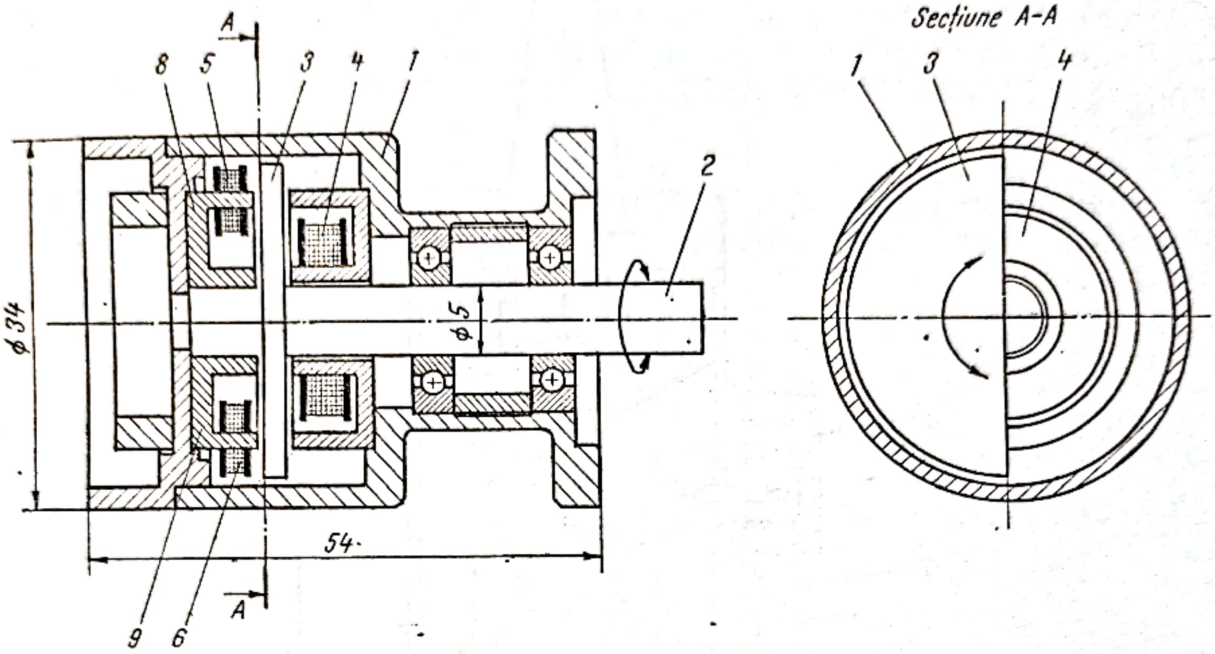


Fig. 3.34.

rențial, iar de cealaltă parte bobinele *5* și *6*, care sînt legate în serie și constituie secundarul transformatorului. Miezurile acestor bobine au fost notate respectiv *7*, *8* și *9*.

Dintre avantajele acestui tip de captor se citează :

— construcția robustă ;

— cuplul rezistent (de măsurare) și cuplul de frecare foarte mici.

c) *Captoare pentru măsurarea presiunilor*. Formele constructive ale captoarelor pentru măsurarea presiunilor variază funcție de mărimea presiunii maxime ce trebuie măsurată. Pentru presiuni mari captoarele au ca element elastic un tub cilindric închis la un capăt, iar pentru presiuni mici o membrană plană sau ondulată, un tub Bourdon sau un silfon. Măsurarea deformațiilor elementului elastic se face cu traductoare rezistive, inductive, capacitive sau piezoelectrice.

Pentru presiuni nominale de 10 pînă la 1000 daN/cm² și temperaturi de la — 20°C la + 70°C s-au realizat captoare rezistive [25], ca cel prezentat în figura 3.35.

Captorul se racordează la incinta a cărei presiune urmează să se măsoare prin intermediul cepului filetat *1*, care face corp comun cu elementul elastic tubular *2*, pe care sînt lipite traductoarele rezistive active *3*, direcția acestora fiind circumferențială. Tubul se continuă cu porțiunea nesolicitată *4* pe care sînt montate traductoarele compensatoare *5*. Carcasa *6* asigură protecția traductoarelor, în interiorul spațiului închis de

Scanned with OKEN Scanner

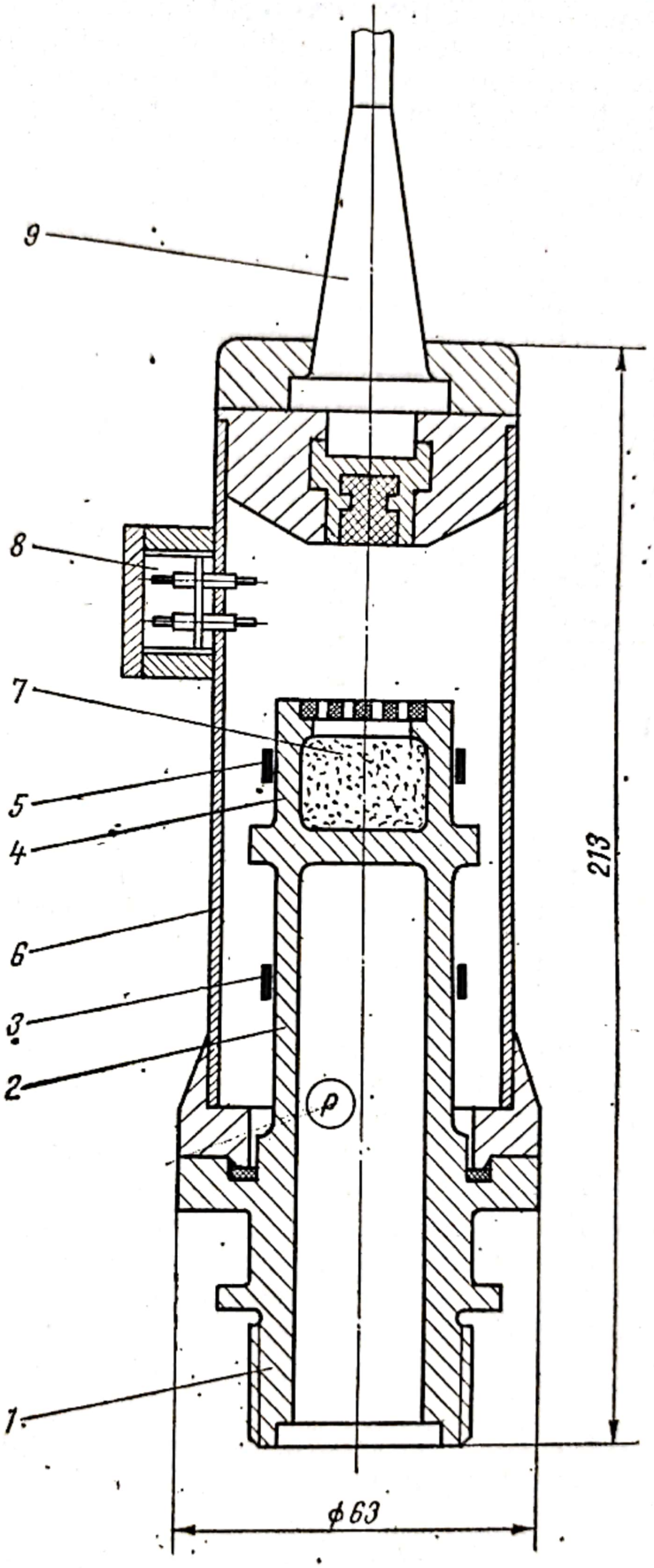


Fig. 3.35.

aceasta asigurîndu-se eliminarea oricăror urme de umiditate de către granulele de silicagel *7*. Rezistenţele adiţionale *8* asigură o echilibrare comodă a circuitului de măsurare. Semnalul de ieşire se transmite prin cablurile *9*.

Pentru a putea utiliza traductoare rezistive obişnuite în construcţia unor captoare ce trebuie să măsoare presiuni ale unor fluide cu temperaturi ridicate, s-au imaginat soluţii constructive la care elementul elastic al captorului nu intră în contact cu fluidul fierbinte, în plus asigurîndu-se şi o răcire intensă a captorului cu aer sau apă rece. În figura 3.36 se prezintă detaliile unei astfel de construcţii [24].

Presiunea fluidului fierbinte solicită la compresiune prin intermediul membranei *1*, elementul elastic *2*, pe care sînt montate traductoarele *3*. Aerul sau apa de răcire intră prin partea superioară a carcasei *4*, străbate

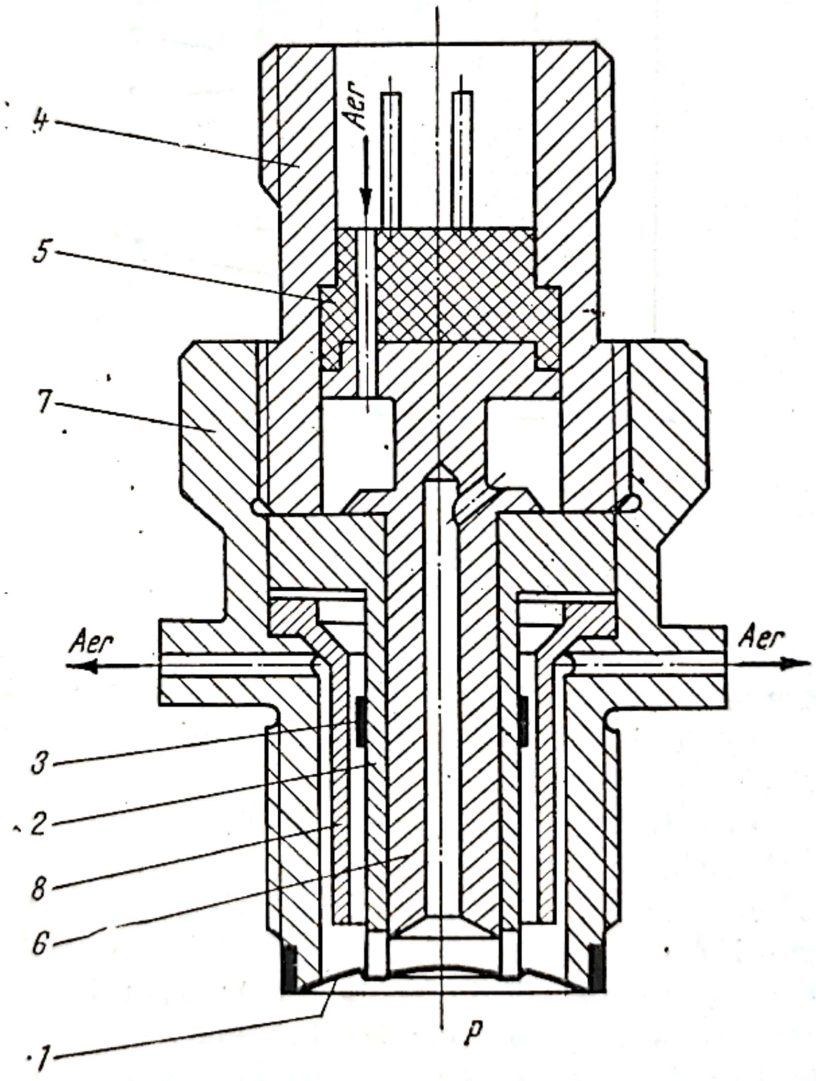


Fig. 3.36.

izolatorul *5* şi ghidajul *6*, evacuîndu-se prin orificiile laterale ale corpului captorului *7*. Tubul *8* asigură dirijarea circulaţiei fluidului de răcire şi protejarea mecanică a traductoarelor.

Scanned with OKEN Scanner

Un exemplu de captor capacitiv pentru măsurarea presiunii este prezentat în figura 3.37, după lucrarea [25].

Corpul *1* al captorului asigură montarea acestuia la locul măsurării, presiunea producînd deformarea elementului elastic *2* care are forma unei plăci circulare. Deformaţiile elementului elastic *2* duc la variaţia distanţei

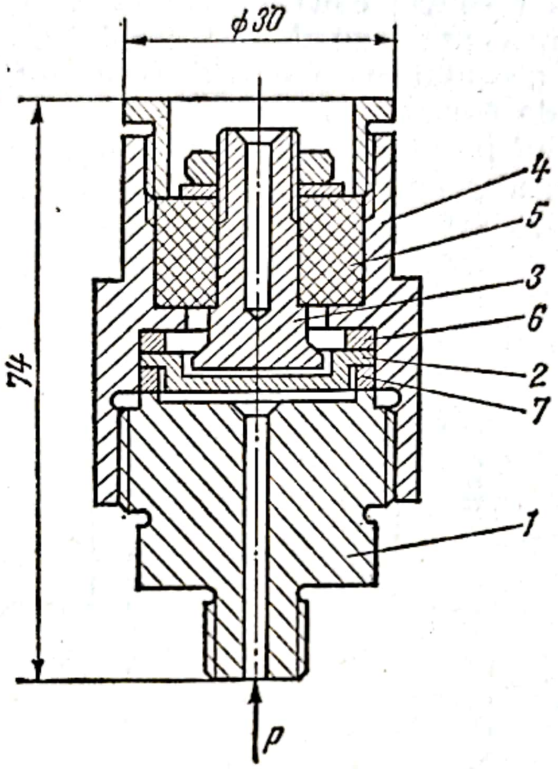


Fig. 3.37.

relative faţă de electrodul *3* şi a modificării capacităţii electrice dintre aceştia. Carcasa *4* şi izolatorul *5* asigură susţinerea electrodului *3*, iar inelele distanţiere *6* şi *7* asigură realizarea distanţei necesare dintre electrodul *3* şi elementul elastic *2*.

Un astfel de captor poate funcţiona în bune condiţii pînă la temperatura de 150°C, cu o liniaritate mai bună de 5%.

Grosimea elementului elastic *2* determină presiunea maximă de lucru a captorului. Astfel, pentru elemente elastice confecţionate din oţel de înaltă rezistenţă cu grosimi de 0,8; 1,0; 1,2; 1,5 mm, presiunile maxime sînt respectiv 25; 40; 60; 90 daN/cm².

d) Captoare pentru măsurarea forţelor. Forma elementului elastic al unui captor pentru măsurarea forţelor are o importanţă deosebită. Pentru proiectarea corectă a acestuia în lucrarea [25] se recomandă respectarea următoarelor reguli:

— elementul elastic să aibe zone cît mai răspîndite în care deformaţiile să fie mari şi uniforme;

Scanned with OKEN Scanner

— traductoarele rezistive pentru măsurarea deformaţiilor specifice ale elementului elastic se vor amplasa la distanţe suficient de mari de punctul de aplicare al forţei ;

— forţa se va aplica pe cît posibil punctiform ;

— traductoarele rezistive se vor amplasa şi conecta astfel încît semnalul de ieşire al captorului să fie proporţional cu media deformaţiilor specifice măsurate în diferitele puncte ale elementului elastic.

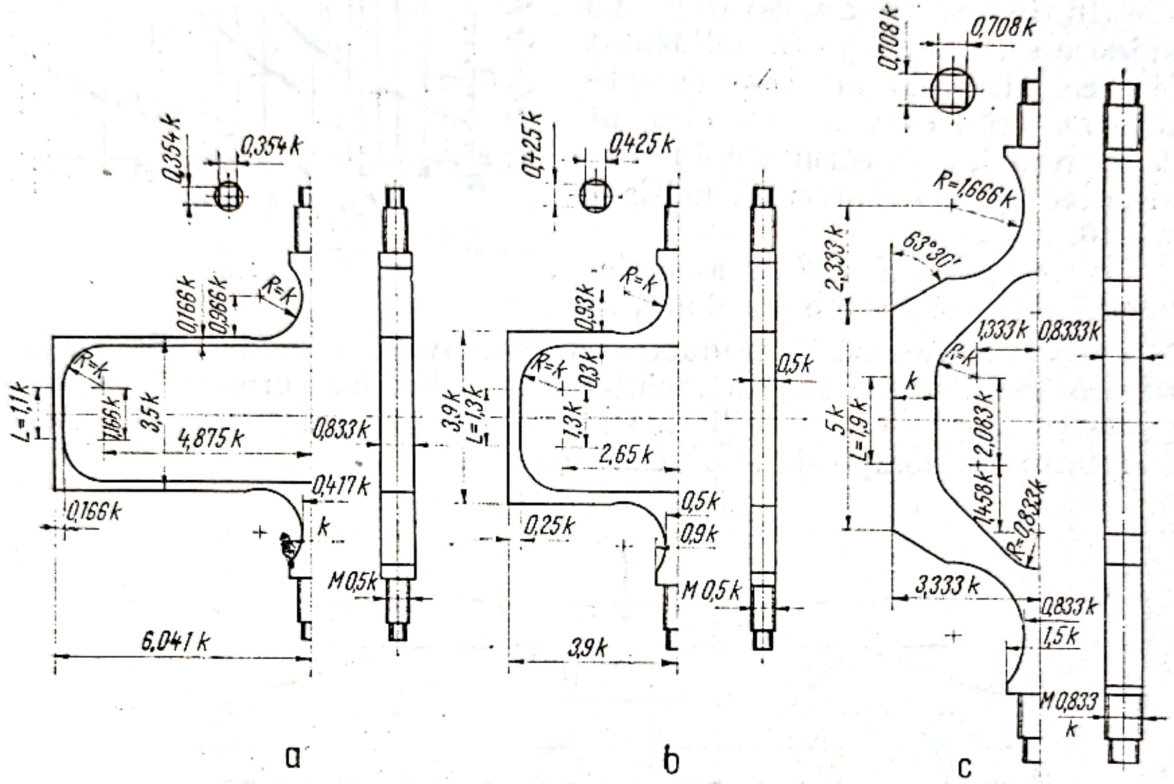


Fig. 3.38.

Pentru captoare cu traductoare rezistive se dau în figura 3.38 formele a trei tipuri de elemente elastice, dimensiunile fiind exprimate funcţie de o constantă k ale cărei valori se determină funcţie de mărimea forţei nominale [25]. Traductoarele rezistive se vor amplasa în zona mediană de lungime L a fiecărui element elastic, raportul dintre deformaţia specifică ε_i măsurată pe suprafaţa interioară şi ε_e, măsurată pe suprafaţa exterioară fiind $\varepsilon_i/\varepsilon_e = 1{,}1$ pentru tipurile a şi b, respectiv 1,2 pentru tipul c (fig. 3.38).

Pentru o valoare de 1 ‰ a deformaţiei specifice medii $\varepsilon_m = 0{,}5(\varepsilon_i + \varepsilon_e)$, constanta k ce defineşte dimensiunile elementelor elastice din figura 3.38 se determină funcţie de forţa nominală P cu ajutorul curbelor reprezentate în figura 3.39. În aceste condiţii, liniaritatea captorului va fi mai bună de 0,5 %.

O sursă posibilă de erori, frecvent întîlnită la măsurarea forţelor, este existenţa unei modificări a direcţiei sau punctului de aplicaţie ale forţei ce se măsoară. Pentru diminuarea acestor efecte se adoptă soluţii

constructive corespunzătoare privind forma elementului elastic, amplasarea și conectarea traductoarelor rezistive, precum și prinderea mecanică a captorului prin intermediul unor elemente de rezemare adecvate. În tabelul 3.8 se dau formele și dimensiunile a patru tipuri de astfel de elemente de rezemare, pentru întindere sau compresiune și forțe nominale de la 10 daN pînă la 10000 kN, recomandate de firma H.B.M.

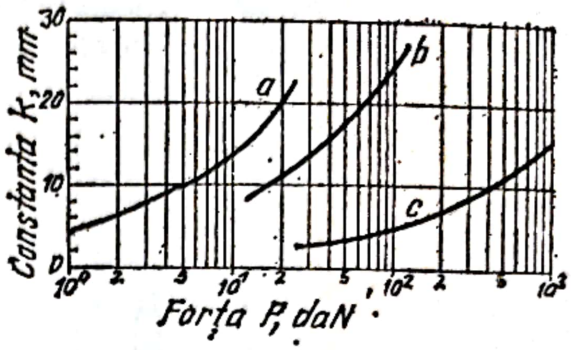


Fig. 3.39.

Un tip de captor al cărui semnal de ieșire este foarte puțin influențat de excentricitatea punctului de aplicație al forței este cel cu element elastic toroidal, ale cărui detalii constructive [25] se prezintă în figura 3.40.

Între plăcile *1* și *2* se află elementul elastic *3* pe care sînt lipite, în direcție circumferențială, traductoarele rezistive *4* și *5*. Inelul de cauciuc *6* asigură închiderea etanșă a incintei captorului, iar șurubul *7* realizează o prestrîngere pentru stabilitatea ansamblului la transport sau montaj, cînd forța de compresiune P este nulă.

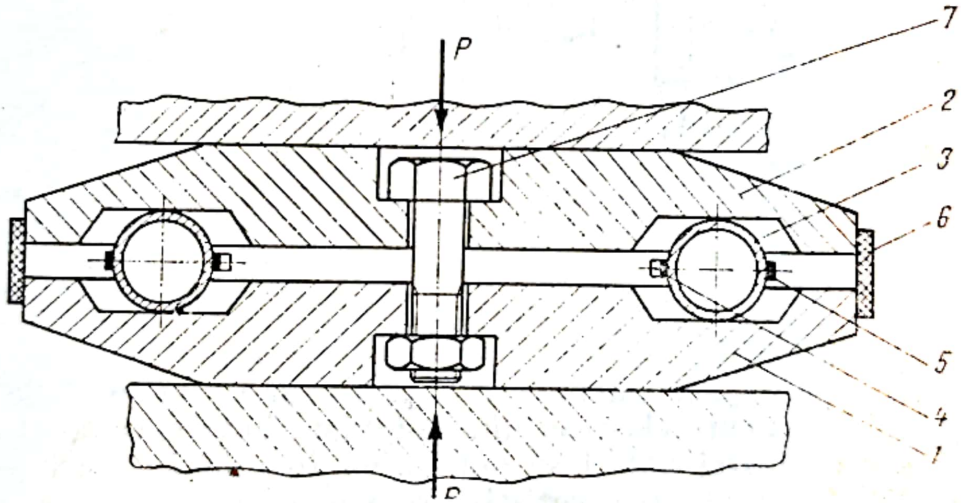


Fig. 3.40.

Pentru măsurarea forțelor de contact dintre roțile diverselor instalații și șinele căii de rulare pe care acestea se deplasează, se utilizează montaje cu traductoare rezistive ca cel din figura 3.41.

Traductoarele se lipesc pe suprafețele laterale ale inimii șinei, la nivelul axei neutre, pe direcții la 45° față de axa șinei (fig. 3.41, a), patru traductoare fiind pe o față a inimii, iar alte patru pe cealaltă față. Conectarea celor opt traductoare se face ca în figura 3.41, b, deformația specifică ε măsurată la puntea tensometrică fiind

$$\varepsilon = \frac{2(1+\mu)}{E} \cdot \frac{S}{bI_z} P, \qquad (3.54)$$

Scanned with OKEN Scanner

în care : μ este coeficientul de contracție transversală al materialului șinei ;
E — modulul de elasticitate ;
b — grosimea inimii șinei în dreptul axei neutre ;
S — momentul static față de axa z, al părții din secțiune situată deasupra acestei axe ;
I_z — momentul de inerție axial al secțiunii șinei.

Așa cum rezultă și din relația (3.54), semnalul de ieșire al captorului nu depinde de distanța l dintre reazeme, nici de existența unor componente

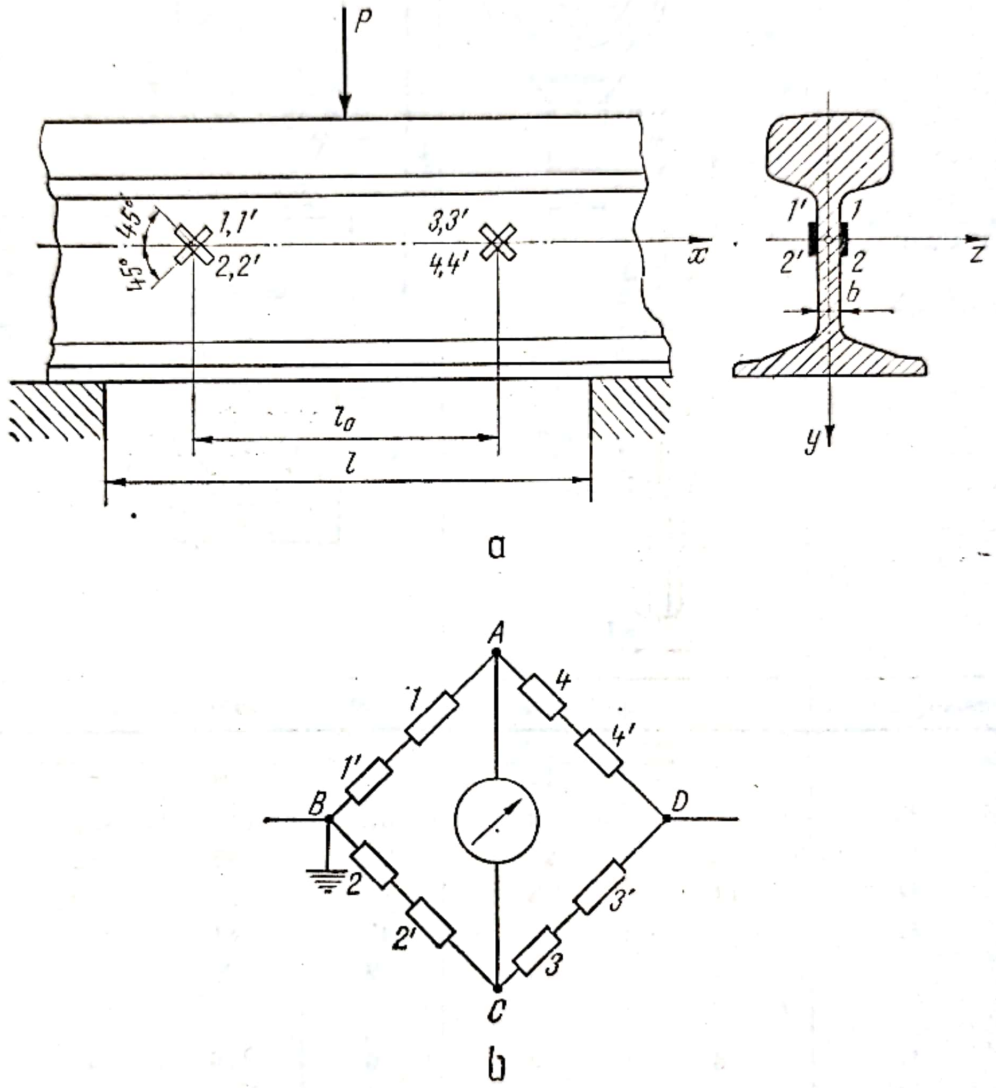
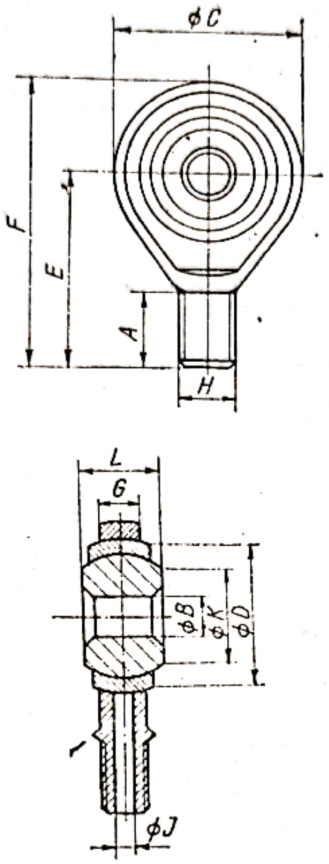
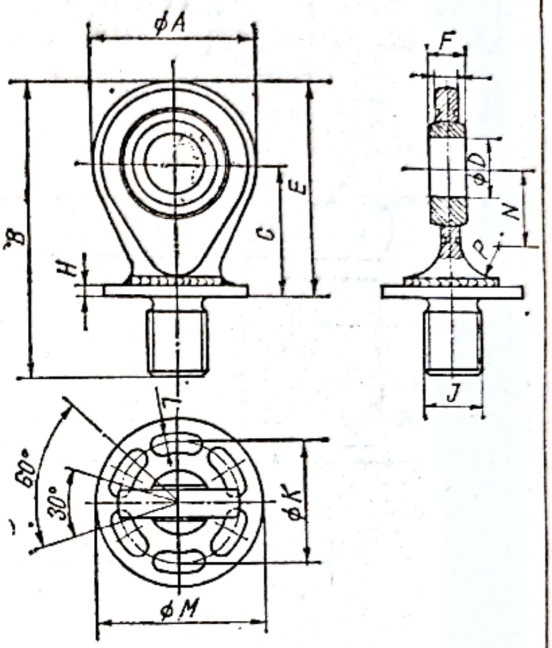


Fig. 3.41.

longitudinale sau transversale ale forței ce solicită șina și nici de poziția forței P ce se măsoară. Singura condiție ce se impune este ca forța P să se afle între cele două secțiuni în care s-au montat traductoarele.

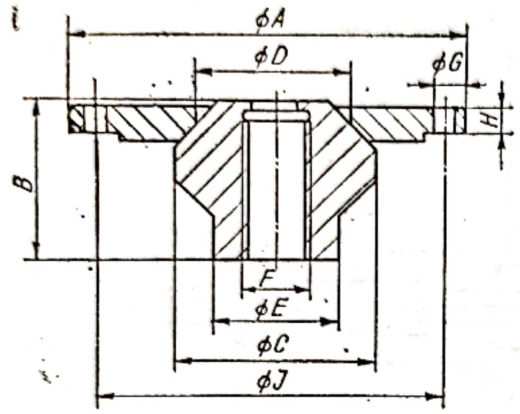
Un exemplu de captor piezoelectric pentru măsurarea forțelor de compresiune se prezintă în figura 3.42. Forța ce se aplică bucșei *1* se transmite lamelelor de cuarț *2* care reprezintă elementul sensibil al capto-

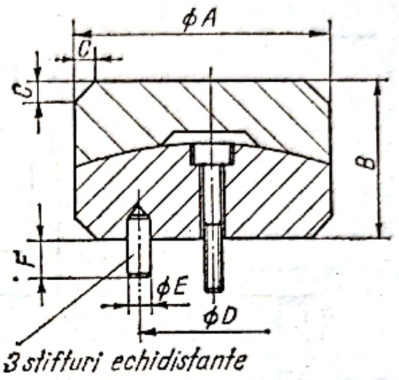
Scanned with OKEN Scanner

Tipul solicitării	Întindere					
Schița elementului de rezemare						
Forța nominală (daN)	20	100	1000	5000	10000	20000
Dimensiuni (mm) A	8	12	30	60	70	110
B	5	8	57	111	151	213
C	16	22	28,5	47	62	94
D	11	15	10	25	30	50
E	21	29	45	81	101	153
F	29	40	9	20	22	35
G	6	9	6	16	18	28
H	M5	M8	3	4	6	8
J	—	3	M 12×1	M 26×1,5	M 39×2	M 52×2
K	7	10	50	60	90	120
L	8	12	9	9	13	15
M			70	80	120	160
N			15	24	34	64
P			5	10	12	3

Scanned with OKEN Scanner

Compresiune





2000	10000	20000	50000	100000	200000	500000	750000	1000000
140	180	232	262	110	140	210	240	240
40	73	96	118	60	75	120	130	150
85	120	160	188	8	10	15	15	15
60	80	107	129	74±0,1	90±0,1	135±0,2	160±0,2	161±0,2
50	80	105	145	6	8	12	16	18
M	M	M	M	5	8	12	16	15
30×2	48×3	72×4	100×4					
9	11	13	13					
10	13	25	25					
120	155	200	230					

rului, de la care semnalul de ieşire se culege de către electrodul inelar *3*. Pentru ca forţa ce se măsoară să se transmită corect cristalului de cuarţ, bucşa *1* este ghidată de arcurile *4* care sînt fixate în carcasa *5* cu ajutorul piuliţei *6* şi al arcului disc *7*. Cristalul piezoelectric *2* se sprijină pe bolţul *8* care asigură şi suprafaţa de rezemare a captorului. Conductorii

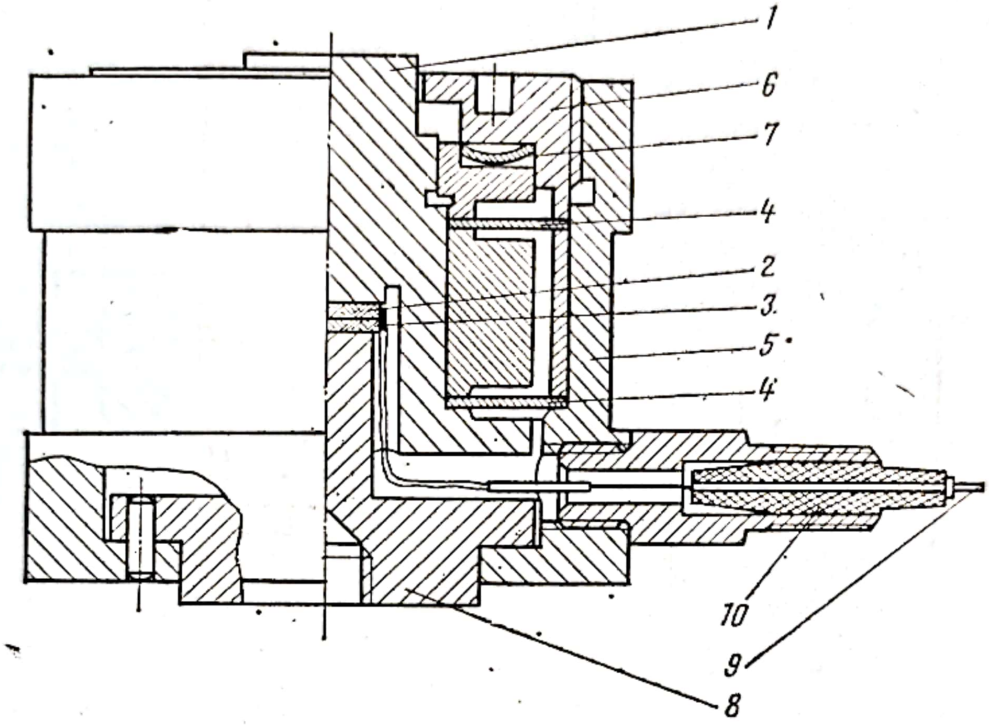


Fig. 3.42.

electrici sînt conectaţi la borna de ieşire *9* care este fixată în izolatorul *10*, rezistenţa de izolaţie trebuind să fie mai mare de 10^{12} Ω.

Se menţionează că un captor de acest tip poate funcţiona în condiţii satisfăcătoare şi ca accelerometru seismic, după o etalonare prealabilă.

e) *Captoare pentru măsurarea cuplurilor de răsucire.* În figura 3.43, a s-a reprezentat schematic un „banc" pentru măsurarea reacţiunii cuplului de răsucire motor sau rezistent al unui echipament oarecare ca : motor electric, pompă, etc. [24].

Echipamentul *1* al cărui cuplu de răsucire urmează să se măsoare, se prinde pe masa *2* astfel încît axul la care se măsoară cuplul să se afle la intersecţia axelor elementelor elastice *3* şi *4* pe care sînt lipite traductoarele rezistive $T_1, \ldots, T_4$, care sînt conectate ca în figura 3.43, b. Ca urmare semnalul de ieşire al instalaţiei este proporţional cu cuplul M_t, fără a fi influenţat de existenţa unor forţe verticale sau orizontale.

Acest dispozitiv are avantajul că elimină necesitatea unor contactoare rotative.

Pentru măsurarea cuplurilor de răsucire avînd valori între 1 şi 1000 daN ·m se utilizează captoare de tipul celui prezentat în figura 3.44 [25].

Arborele *1* reprezintă elementul elastic al captorului, pe porţiunea sa centrală fiind montate traductoarele *2* în punte completă. La capete

Scanned with OKEN Scanner

arborele are canale de pană pentru a putea prelua cuplul de răcire ce urmează să se măsoare. Semnalul de ieşire se culege de către periile *3* de pe inelele *4*. Carcasa *5* şi rulmenţii *6* asigură funcţionarea corectă şi sigură a captorului.

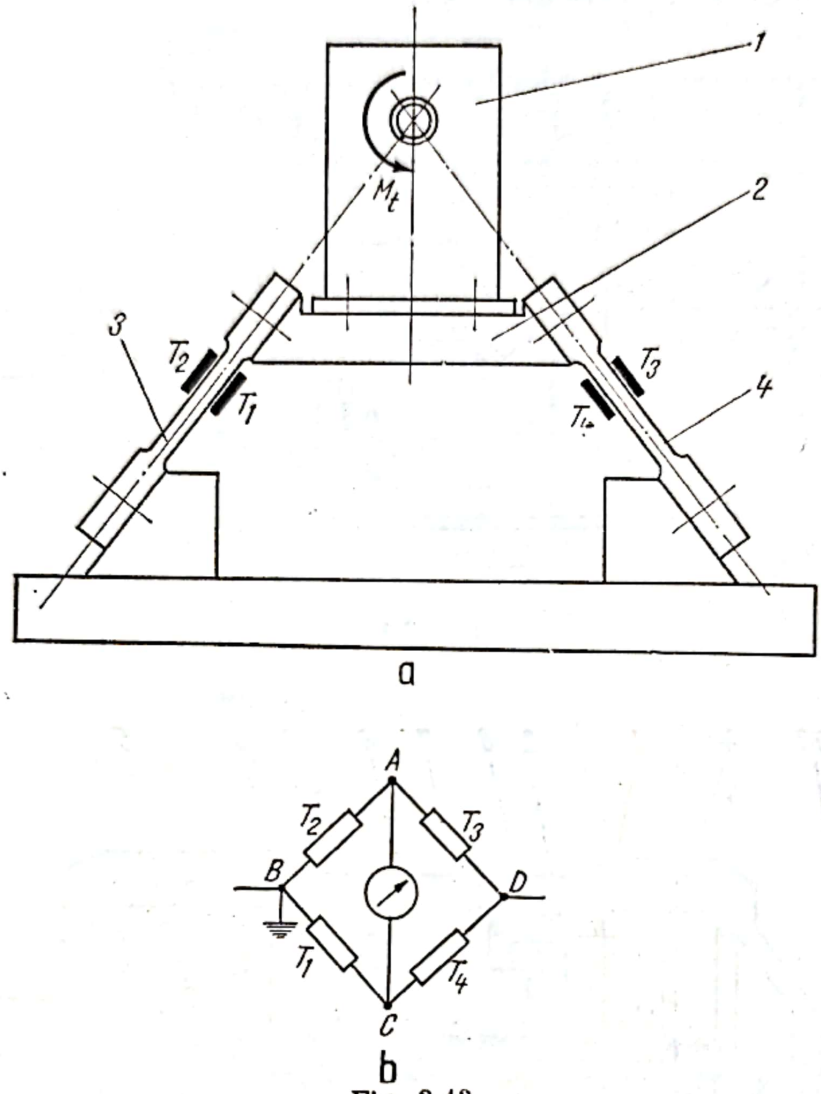


Fig. 3.43.

f) *Captoare pentru măsurarea vitezelor.* Pentru măsurarea vitezelor se utilizează frecvent captoare electrodinamice.

În figura 3.45 s-a reprezentat un astfel de captor, pentru măsurarea vitezelor liniare [12].

Captorul este de tip seismic, echipamentul mobil fiind format din tija *1*, bobina *2* şi bucşa de cupru *3* care sînt suspendate de către membranele elastice *4* şi *5*.

Ca urmare a antrenării carcasei *6* în mişcarea a cărei viteză urmează să se măsoare, bobina *2* va tăia liniile cîmpului magnetic produs de magnetul permanent *7* şi transmis piesei polare *8*. În dreptul piesei polare *9* se va deplasa bucşa de cupru *3* în care vor apare curenţi turbionari, care

Scanned with OKEN Scanner

asigură amortizarea sistemului mobil. Semnalul de ieşire se culege la racordul 10.

Frecvenţa proprie a captorului este de cca 12 Hz, frecvenţa limită superioară fiind de aproximativ 1000 Hz. Captorul poate funcţiona în poziţie orizontală sau verticală.

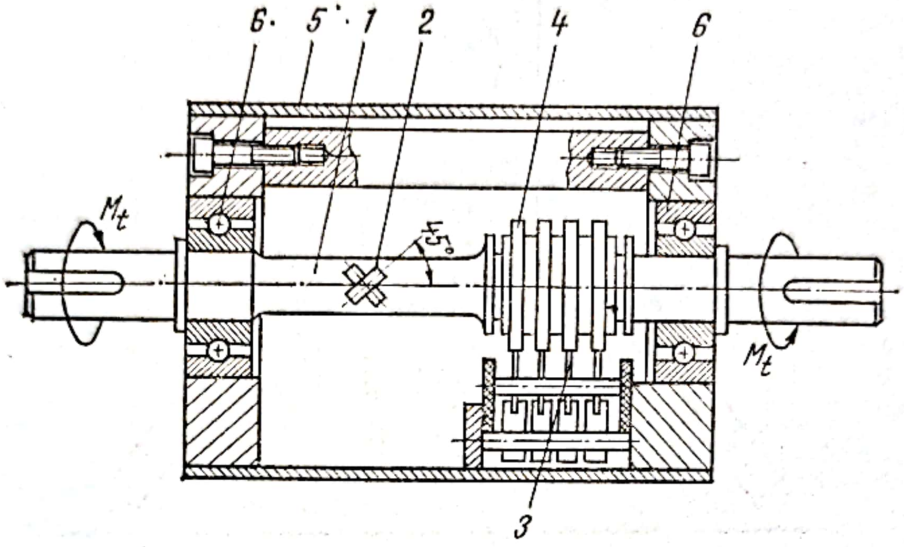


Fig. 3.44.

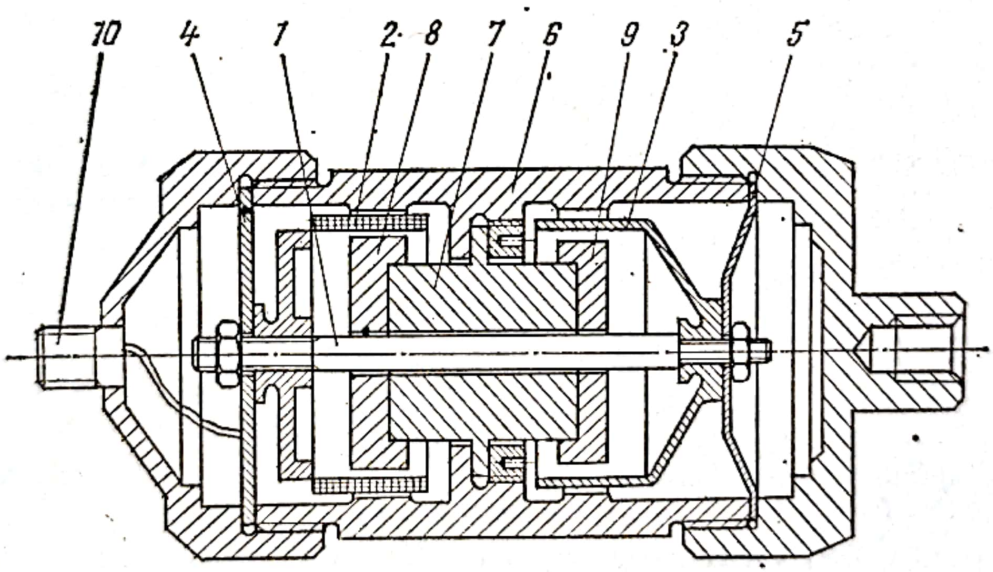


Fig. 3.45.

g) *Captoare pentru măsurarea acceleraţiilor.* În figura 3.46, a se prezintă construcţia unui captor seismic pentru măsurarea acceleraţiilor [24] de pînă la $\pm$ 5000 *g*, cu frecvenţe de pînă la 5 kHz.

Pe bucşele de duraluminiu *1* şi *2*, care constituie elementele elastice ale captorului, sînt montate pe direcţii longitudinale opt traductoare rezistive *3*, aşa cum se vede în figura 3.46, b. Cu şurubul *4* se prestrînge

Scanned with OKEN Scanner

ansamblul format de masele seismice *5, 6* şi bucşele *1, 2.* pînă cînd în acestea din urmă se produce o deformaţie specifică de 1.400 μm/m.

Prin antrenarea în mişcare a flanşei de prindere *7* şi a carcasei *8*, au loc variaţii egale şi de semne contrare ale solicitării în cele două bucşe, proporţionale cu acceleraţia mişcării.

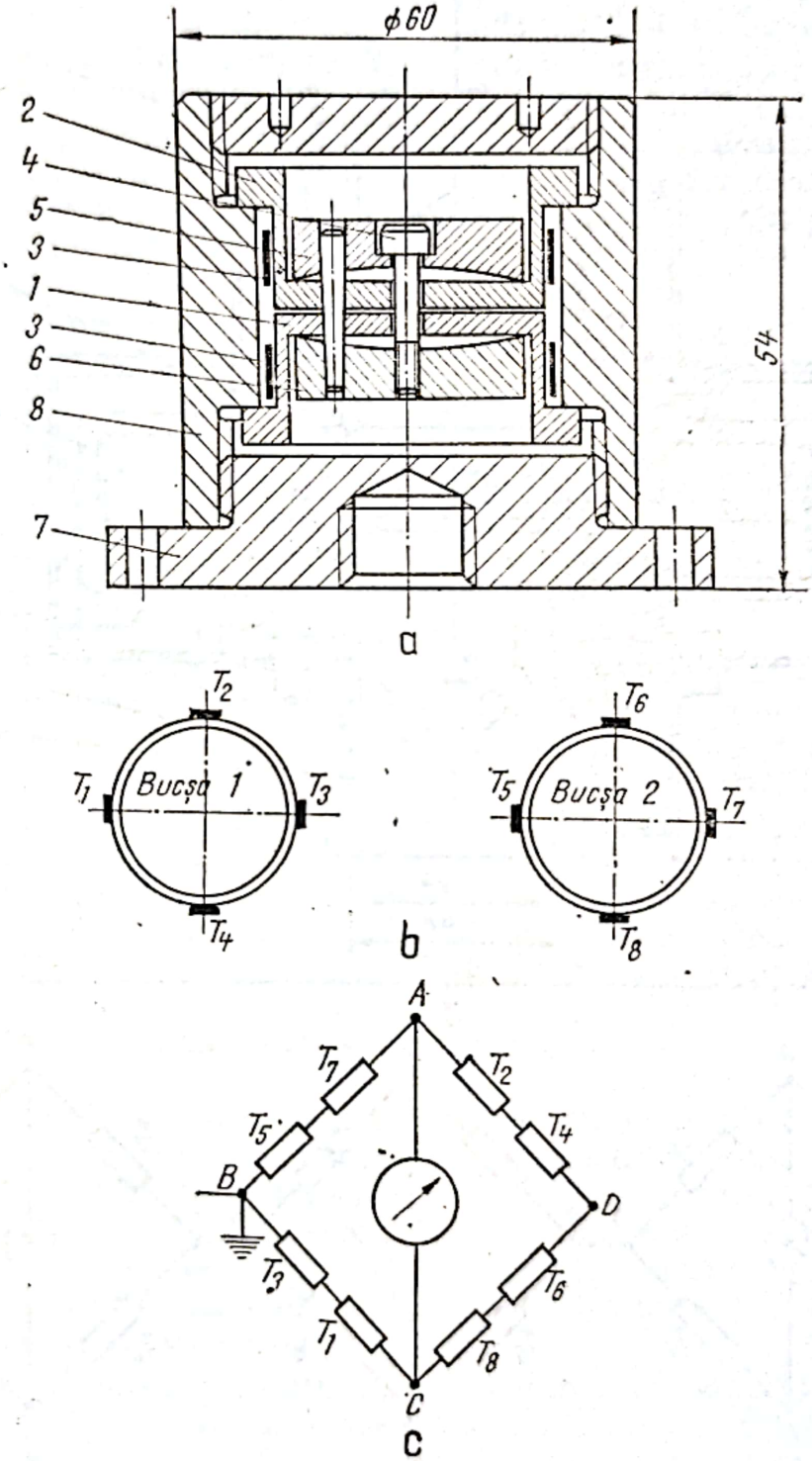


Fig. 3.46.

Conectarea traductoarelor ca în figura 3.46, c asigură o sensibilitate transversală foarte mică şi o bună compensare termică.

Scanned with OKEN Scanner

h) *Captoare pentru măsurarea a două sau mai multe componente ale torsului de reducere al unui sistem de sarcini.* Marea varietate a captoarelor fabricate de firme specializate nu acoperă decît necesitățile unor măsurări

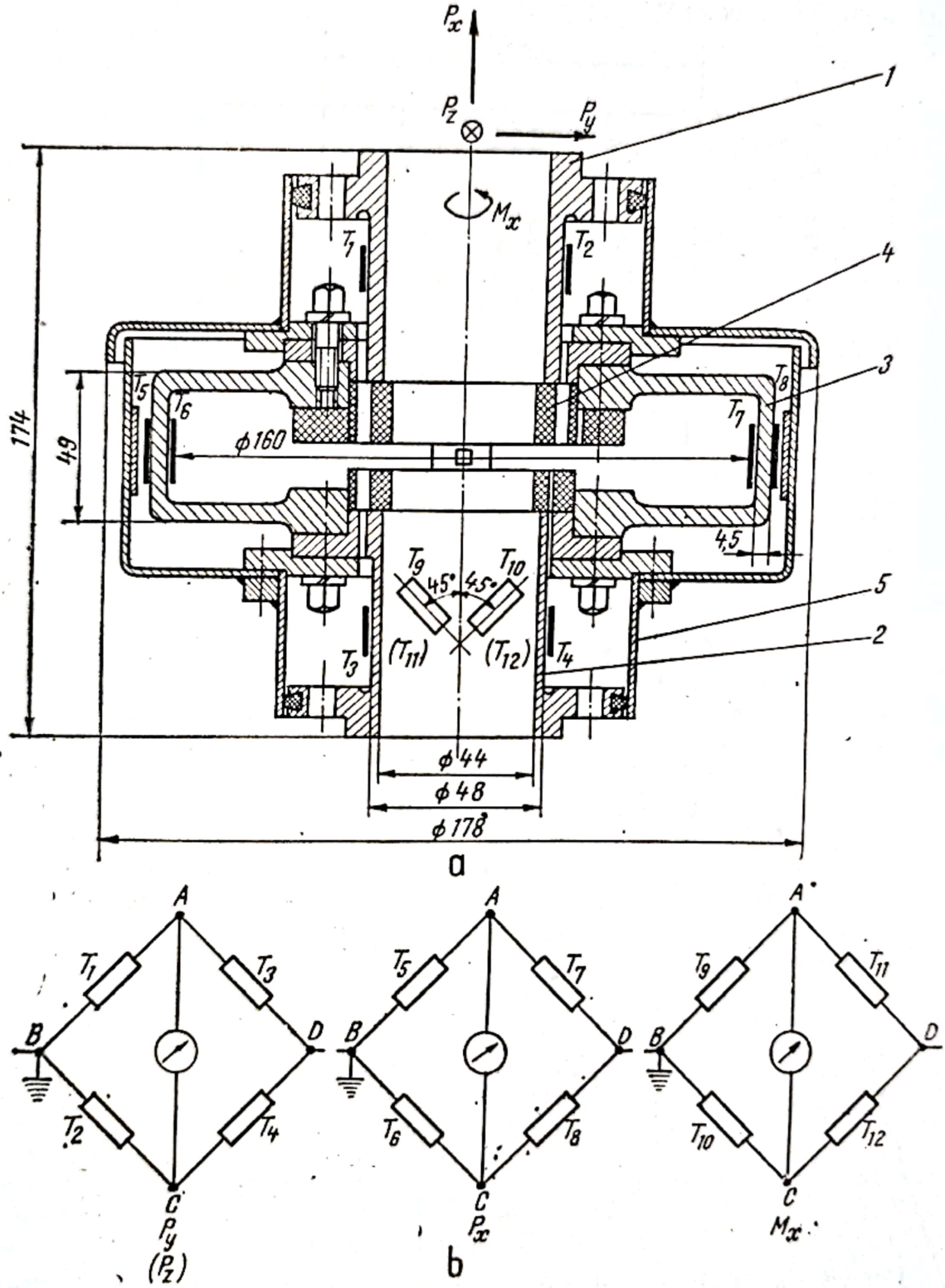


Fig. 3.47.

obișnuite, pentru cazurile speciale ivite în industrie și cercetare fiind necesare construcții de captoare deosebite. Ilustrative în acest sens sînt captoarele pentru măsurarea mai multor mărimi, care utilizează traductoare rezistive.

Astfel, captorul prezentat în figura 3.47, a este destinat măsurării componentelor P_x, P_y, P_z ale unei forțe avînd o direcție oarecare, precum și momentul de răsucire M_x. Pentru aceasta captorul este format din elementele elastice cilindrice *1* și *2* pe care sînt lipite traductoarele rezistive T_1, T_2, respectiv T_3, T_4, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, destinate măsurării componentei P_y a forței, respectiv a momentului de răsucire (fig. 3.47, b). Pentru măsurarea componentei P_z s-au lipit într-un plan perpendicular pe planul desenului încă patru traductoare în poziții similare cu $T_1, \ldots$ $\ldots, T_4$ [25].

Pentru măsurarea componentei P_x, pe elementele elastice *3* s-au lipit traductoarele T_5, T_6, T_7, T_8 conectate ca în figura 3.47, b. Bornele legăturilor electrice sînt fixate pe inelele izolatoare *4*, captorul fiind închis într-o carcasă *5*.

Executat din oțel aliat cu crom și nichel cu dimensiunile din figura 3.47, a, captorul are următoarele caracteristici:

— pentru $P_y = P_z = 40$ daN, $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 175$ μm/m;
— pentru $P_x = 200$ daN, $\varepsilon_x = 750$ μm/m;
— pentru $M_x = 20$ daNm, $\varepsilon_{M_x} = 1200$ μm/m.

În figura 3.48, a s-a reprezentat schematic elementul elastic al unui captor destinat măsurării celor șase componente ale torsului de reducere al unui sistem oarecare de sarcini [23], destinat studiilor pe modele în tunelele aerodinamice, cercetării forțelor de așchiere, etc.

Amplasarea traductoarelor și modul lor de conectare, pentru fiecare din cele șase mărimi ce se măsoară, sînt reprezentate în figura 3.48. Prin dimensionarea corespunzătoare a elementului elastic se poate realiza ca pentru fiecare din cele șase mărimi să se realizeze o sensibilitate satisfăcătoare a captorului pentru valoarea nominală a acesteia.

3.5.5. ETALONAREA CAPTOARELOR

În vederea efectuării unor măsurări corecte cu ajutorul unui captor, este necesar ca acesta să fie însoțit de o curbă de etalonare determinată experimental la fabricarea acestuia. Deseori este necesar ca ulterior să se verifice sau să se corecteze această curbă, mai ales după utilizări îndelungate ale captorului sau în urma unor incidente survenite la transport, depozitare, măsurare, etc., cum ar fi suprasolicitările, expunerea la temperaturi ridicate, umiditate excesivă etc.

Alteori este necesar un studiu mai complet al captorului în vederea determinării și a altora din caracteristicile generale definite la paragraful 3.5.2.

Prelucrarea datelor obținute la etalonare trebuie făcută așa cum se arată în capitolul 12 și în special în paragraful 12.4 referitor la caracteristicile metrologice ale mijloacelor de măsurare.

Scanned with OKEN Scanner

Metodele de etalonare utilizate depind de tipul mărimii ce se măsoară, de valoarea sarcinii nominale, precizia captorului, tipul acestuia, scopul etalonării, etc.

Cea mai des utilizată metodă de etalonare este metoda comparării, care constă în compararea mărimii de ieşire a captorului ce se studiază cu cea a unui captor etalon, cînd ambelor li se aplică aceeaşi sarcină.

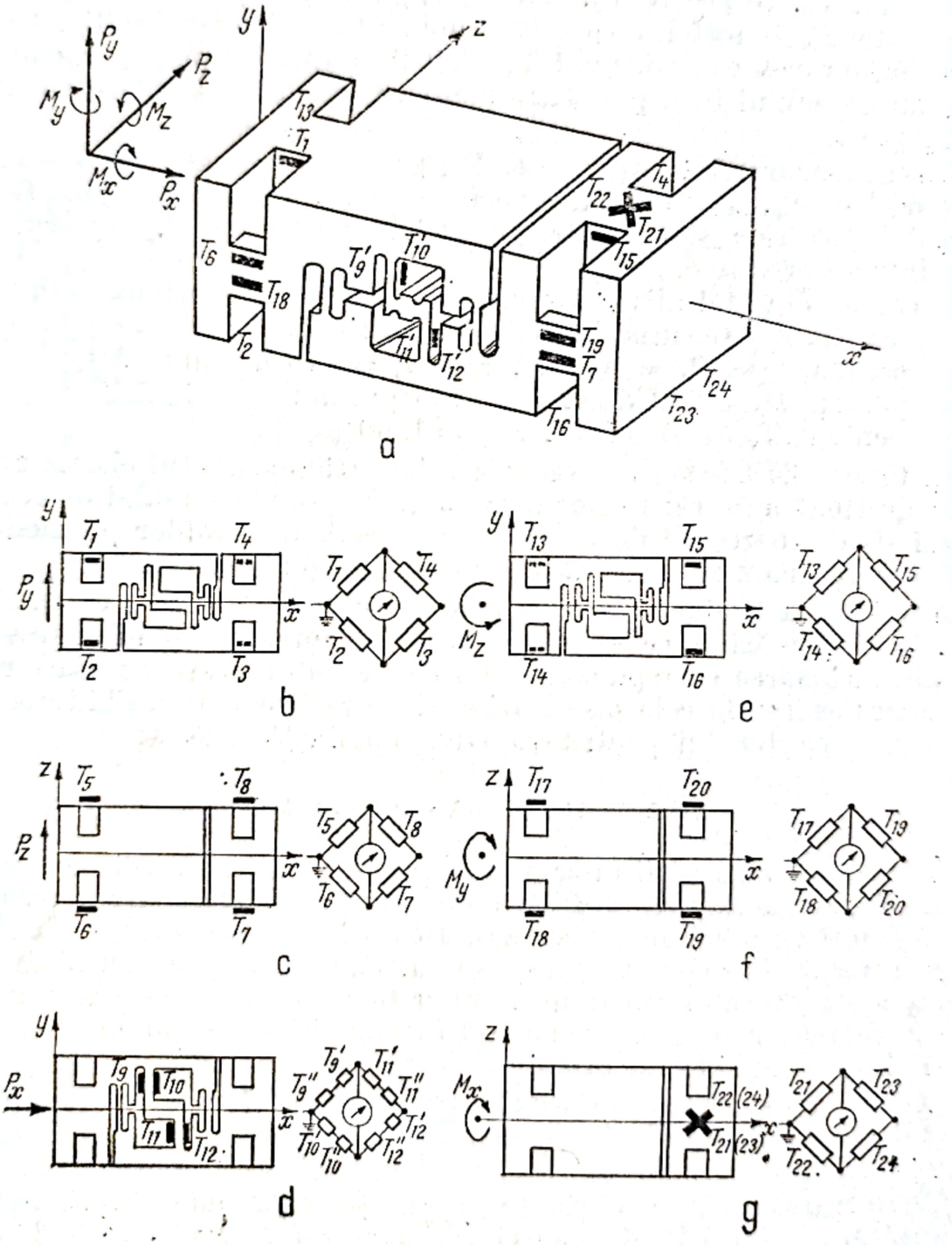


Fig. 3.48.

Scanned with OKEN Scanner

În acest scop cele două captoare se montează pe un dispozitiv de etalonare adecvat, care trebuie să îndeplinească următoarele condiţii generale:

— posibilitatea reglării fine, continue sau în trepte a sarcinii, pe întregul domeniu de funcţionare al captorului ce se etaloncază;

— reglarea sarcinii să se poată face în sens crescător cît şi în sens descrescător;

— posibilitatea menţinerii un timp suficient de lung a unei anumite valori a sarcinii;

— asigurarea unei montări corecte a celor două captoare astfel încît sarcina să li se aplice cu aceeaşi mărime, direcţie şi punct de aplicaţie.

Pentru ilustrarea acestor principii în figura 3.49 se prezintă un dispozitiv pentru etalonarea captoarelor destinate măsurării deplasărilor sau deformaţiilor [25].

Pe masa rigidă *1* se află suporţii *2* şi *3* de care sînt fixate dispozitivul etalon *4*, respectiv dispozitivele de reglare a deplasării *5* şi *6*.

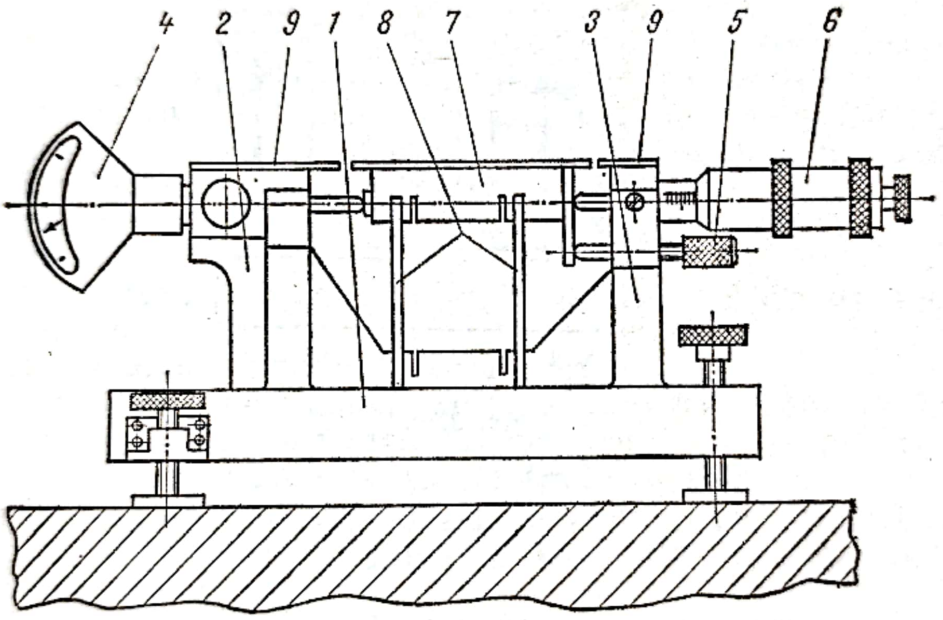


Fig. 3.49.

Cu ajutorul acestora se produce deplasarea mesei mobile *7* (care este fixată cu arcurile lamelare *8*) în raport cu masa fixă *9*, solidară cu restul dispozitivului. Captorul ce urmează să se etaloneze se montează pe masa mobilă *7*, palpatorul acestuia fiind fixat pe masa fixă *9*.

Pentru etalonarea captoarelor destinate măsurării vibraţiilor se utilizează vibratoare electrodinamice ca cel reprezentat în figura 3.50, produs de firma S.A.D. (R.D.G.).

La cele două extremităţi ale bolţului mobil *1* se montează captorul etalon, respectiv captorul ce se studiază. Bolţul este susţinut de membranele elastice *2* şi este antrenat în mişcare de cele două bobine *3* care

Scanned with OKEN Scanner

se află în cîmpul produs de magneţii permanenţi *4* fixaţi în carcasa *5*. Alimentînd bobinele *3* cu un semnal electric de o frecvenţă şi tensiune corespunzătoare, se obţine o variaţie a deplasării, vitezei sau acceleraţiei vibraţiilor într-un domeniu de reglare suficient de întins.

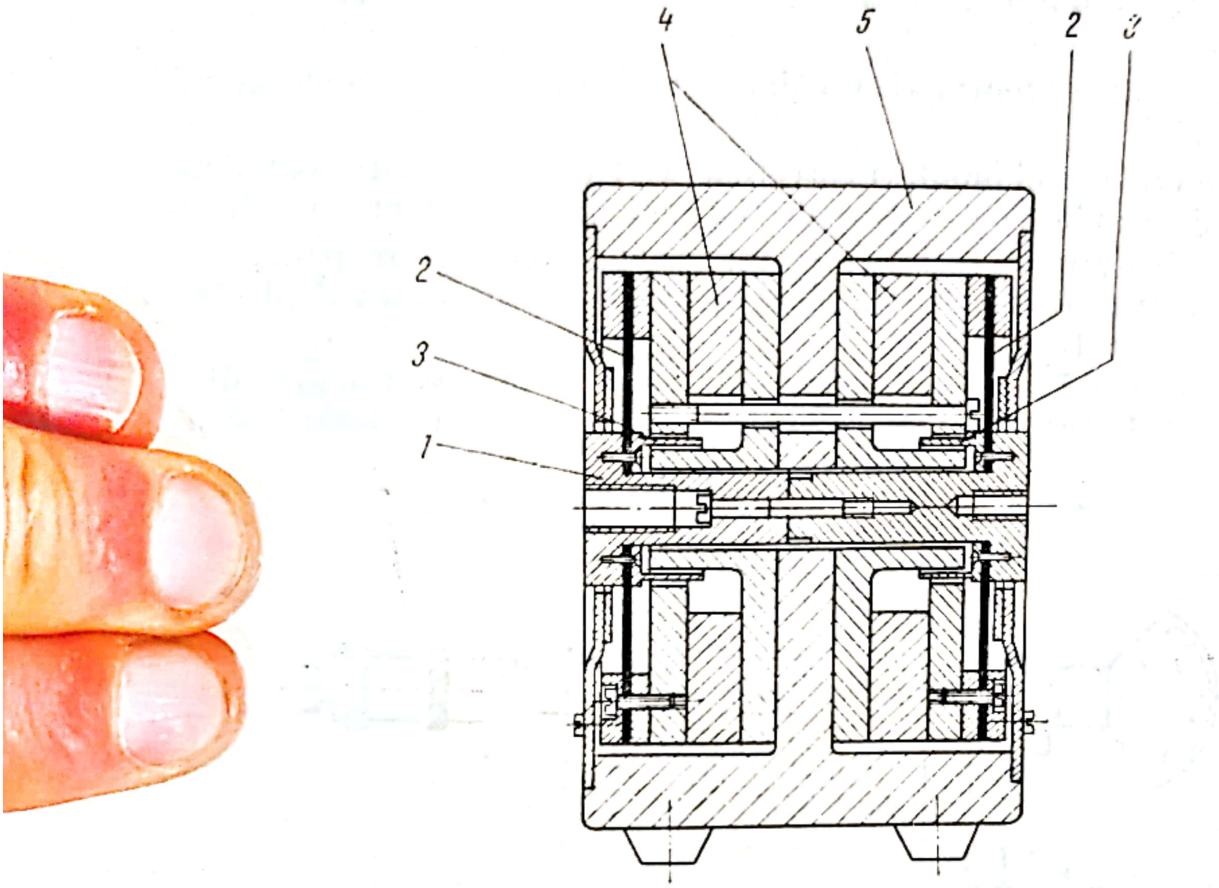


Fig. 3.50.

3.6. LANŢURI DE MĂSURĂ UTILIZATE ÎN TENSOMETRIA ELECTRICĂ

3.6.1. GENERALITĂŢI

Prin aplicarea din ce în ce mai largă a tensometriei electrice ca metodă de cercetare experimentală, fabricile constructoare au acordat o atenţie mereu sporită aparaturii de măsură înregistrîndu-se astfel o puternică dezvoltare atît sub aspect cantitativ cît şi calitativ.

În stadiul actual, aparatura folosită în tensometria electrică realizează performanţe superioare prezentînd următoarele avantaje:

— are o durată de funcţionare şi o fiabilitate mai mare decît a aparaturii mecanice;

— reduce mult durata unui ciclu de măsurări, faţă de alte metode;

— permite înregistrarea şi transmiterea la distanţă a rezultatelor obţinute, rezultate care, ulterior sau chiar în timpul efectuării măsurării, pot fi centralizate, stocate şi prelucrate; aceste rezultate pot fi redate şi prelucrate automat în formă digitală;

Scanned with OKEN Scanner

— permite adaptarea altor instalaţii electrice în scopul supravegherii, înregistrării şi reglării automate a unor procese.

Procesul de măsurare se realizează cu o serie de aparate şi dispozitive care constituie la un loc un *lanţ de măsură*.

În tensometria electrică, orice lanţ de măsură este, în principiu, alcătuit din 3 părţi principale: traductorul, respectiv captorul, amplificatorul tensometric şi dispozitivul (aparatul) de evaluare a mărimii măsurate. În afară de acestea, instalaţia tensometrică poate fi completată, în cazul în care natura măsurării o cere, cu diverse dispozitive (aparate) auxiliare: cutii de comutare (manuală sau automată), filtre, modulatoare, convertoare de sistem analog-digital etc.

Posibilităţile de utilizare a traductoarelor, respectiv a captoarelor, în cazul măsurărilor diverselor mărimi mecanice sînt arătate în tabelul 3.9. Tabelul se referă numai la traductoarele şi captoarele care se pot realiza sau procura relativ uşor; nu au fost trecute traductoarele cu destinaţie specială sau cele apărute recent, deoarece nefiind folosite mult timp, nu se pot trage încă concluzii asupra comportării lor.

Semnificaţia notaţiilor din tabel este următoarea:

● — traductorul este adecvat pentru măsurarea respectivei mărimi într-un domeniu mare de amplitudini şi frecvenţe;

○ — traductorul este utilizabil pentru măsurarea respectivei mărimi, însă într-un domeniu restrîns de amplitudini şi frecvenţe necesitînd dispozitive şi aparatură intermediară;

× — traductorul permite măsurări într-un domeniu foarte restrîns fiind rar utilizat;

– — traductorul nu este adecvat pentru măsurarea respectivei mărimi.

Din examinarea tabelului 3.9 rezultă că:

— toate tipurile de traductoare (captoare) pot fi cuplate la amplificatoarele tensometrice cu frecvenţă purtătoare; cu excepţia traductoarelor active, toate celelalte tipuri de traductoare se cuplează direct;

— majoritatea tipurilor de traductoare pot fi cuplate şi la amplificatoarele tensometrice de curent continuu; excepţie fac traductoarele pasive care nu sînt rezistive.

— traductoarele care oferă cele mai mari posibilităţi de utilizare sînt cele rezistive; acestora le urmează cele inductive pasive.

3.6.2. AMPLIFICATORUL TENSOMETRIC

Deoarece semnalul electric dat de traductorul tensometric este foarte slab, este necesară amplificarea acestui semnal; amplificatorul tensometric (numit şi „punte tensometrică") are rolul de a amplifica şi de a transforma, eventual, semnalul recepţionat de la traductor astfel încît să poată acţiona, la ieşirea lui, un instrument de măsură sau un aparat de înregistrare.

Amplificatoarele tensometrice trebuie să reproducă fidel la ieşire semnalul primit la intrare; deci ele trebuie să îndeplinească două condiţii:

— să nu introducă distorsiuni; pentru aceasta aparatul trebuie să aibă o plajă de amplificare suficient de mare pentru a se evita producerea

Scanned with OKEN Scanner

Posibilităţile de utilizare ale traductoarelor şi captoarelor *Tabelul 3.9*

Mărimile măsurate	Regimul de măsurare a fenomenului	Traductoare şi captoare									
		Capacitive	Magnetoelastice	Inductive	Rezistive: trad. metalice cu fir sau folie	Rezistive: cu semiconductoare	Rezistive: metalice cu reţea liberă	Rezistive: potenţiometrice	Inductive electrodinamice	Piezoelectrice	Termoelectrice
Deplasări, unghiuri	de lungă durată	–	–	●	●	×	–	●	–	–	–
	cvasistatic	○	–	●	●	○	–	○	–	–	–
	dinamic	●	–	●	○	○	○	–	○	○	–
Viteze	–	○	–	○	○	○	○	×	●	○	–
Acceleraţii	static	–	–	●	●	○	●	●	–	–	–
	dinamic	●	–	●	●	●	●	×	○	●	–
Deformaţii specifice	de lungă durată	–	–	●	●	○	×	○	–	–	–
	cvasistatic	○	–	●	●	●	×	○	–	○	–
	dinamic	●	–	●	●	●	×	–	–	●	–
Forţe	de lungă durată	–	●	●	●	○	●	●	–	–	–
	cvasistatic	○	●	●	●	●	●	○	–	○	–
	dinamic	●	–	●	●	●	×	–	–	●	–
Presiuni	de lungă durată	–	●	●	●	○	●	●	–	–	–
	cvasistatic	○	●	●	●	●	●	○	–	○	–
	dinamic	●	○	●	●	●	×	–	–	●	–
Momente de torsiune	static	–	●	●	●	○	○	○	–	–	–
	dinamic	○	–	●	●	●	○	–	–	○	–
Temperaturi	de lungă durată	–	–	–	●	●	●	–	–	–	●
	cvasistatic	–	–	–	●	●	●	–	–	–	●
	dinamic	–	–	–	○	○	×	–	–	–	○
OBSERVAŢII: Traductoarele se pot conecta la amplificatoarele tensometrice	cu frecvenţă purtătoare,	Direct	Direct	Direct	Direct	Direct	Direct	Direct	Indirect	Indirect	Indirect
	de curent continuu	Nu	Nu	Nu	Da	Da	Da	Da	Da	Da	Da

Scanned with OKEN Scanner

distorsiunilor neliniare şi în acelaşi timp să aibă o bandă de trecere suficient de largă pentru evitarea distorsiunilor liniare (dependente de frecvenţa fenomenului) ;

— să nu fie sensibile la influenţele perturbatoare externe ; pentru aceasta, la realizarea constructivă a amplificatoarelor trebuie să se ia măsuri de evitare a influenţelor paraziţilor atmosferici şi a celor din reţeaua electrică de alimentare ; de asemenea trebuie luate măsuri pentru ca variaţia tensiunii de alimentare şi variaţia temperaturii mediului ambiant să nu afecteze rezultatele măsurărilor.

Amplificatoarele tensometrice pot fi clasificate în 3 grupe în funcţie de felul de alimentare al punţii de traductoare şi al semnalului amplificat :

— amplificatoare tensometrice cu frecvenţă purtătoare
— „ „ de curent continuu
— compensatoare

Amplificatoarele tensometrice cu frecvenţă purtătoare. La acest tip de amplificatoare puntea de traductoare este alimentată cu un curent alternativ de frecvenţă audio. Semnalul electric dat de traductoare modulează semnalul purtător de frecvenţă f_0 şi amplitudine A_0 constantă astfel încît la intrarea amplificatorului se aplică un semnal modulat.

Din punct de vedere al frecvenţei purtătoare se disting amplificatoare tensometrice cu :

— frecvenţe purtătoare joase (aproximativ 250 Hz)
— „ „ medii („ 5 kHz)
— „ „ ridicate („ 50 kHz)

Schema-bloc a amplificatorului tensometric cu frecvenţă purtătoare este arătată în figura 3.51.

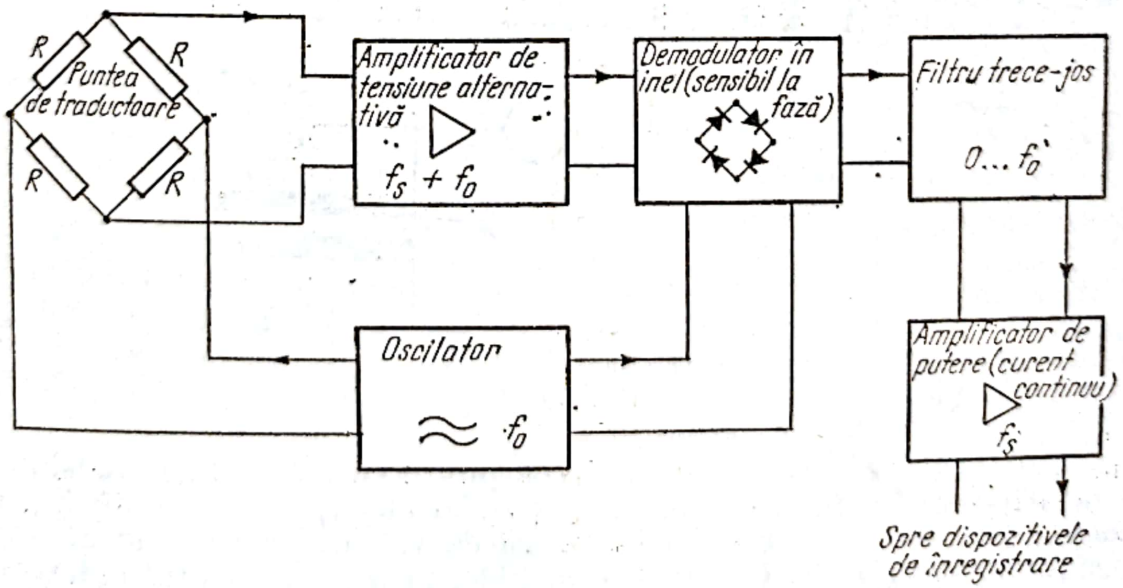


Fig. 3.51.

a) *Amplificatorul de tensiune alternativă* are rolul de a amplifica semnalul modulat cules la bornele diagonalei de măsură a punţii de traductoare. Este constituit din 2...3 etaje de amplificare. La intrarea primului etaj se află un divizor potenţiometric cu care se alege sensibilitatea (domeniul de măsură) al amplificatorului tensometric. În acest bloc se iau măsuri speciale pentru eliminarea distorsiunilor liniare şi a celor neliniare prin reacţie negativă (de tensiune sau/şi de curent), pentru eliminarea tensiunii de zgomot, a autooscilaţiei şi a efectului microfonic (efectul Larsen). O descriere mai amănunţită a acestui bloc şi a celorlalte blocuri este făcută în lucrarea [19].

b) *Blocul oscilator* este constituit dintr-un etaj oscilator completat, de cele mai multe ori, cu un etaj amplificator de putere. Blocul oscilator are rolul de a genera energia electrică necesară alimentării punţii de traductoare cît şi tensiunea de comparare care se aplică demodulatorului în inel (sensibil la fază). Frecvenţa semnalelor aplicate este fo (frecvenţa purtătoare).

c) *Blocul demodulator*, sensibil la fază, este constituit din patru diode montate în „inel" ca în figura 3.52.

Tensiunea U_2 dată de oscilator se aplică prin transformatorul *Tr.2* la diagonala *AC* a punţii cu diode. Prin diodele *1* şi *2* va circula un curent i_2 iar prin diodele *3* şi *4* nu va circula nici un curent, dacă în acel moment tensiunea are polaritatea din figură.

Simultan însă, tensiunea U_1 reprezentînd semnalul amplificat obţinut la ieşirea amplificatorului de tensiune alternativă este aplicată, prin

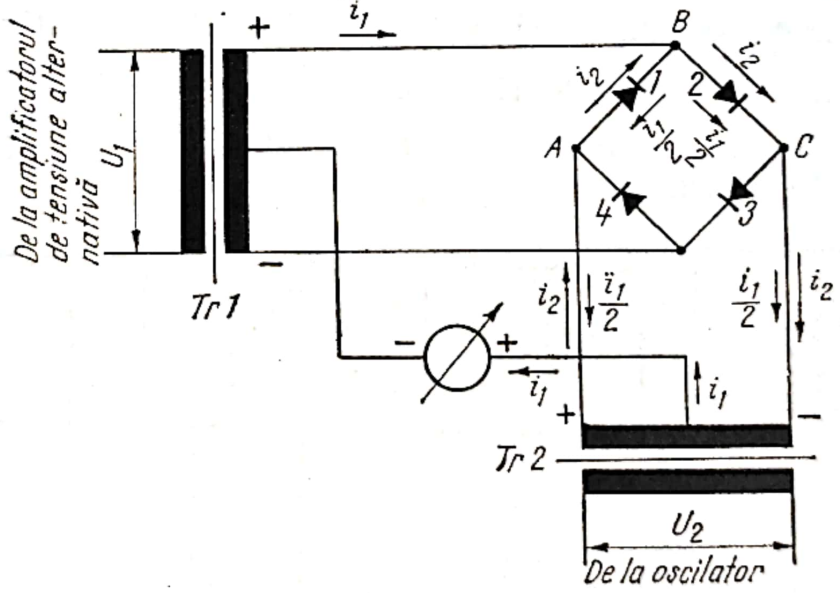


Fig. 3.52.

transformatorul *Tr* 1, la diagonala *BD* a punţii cu diode. Dacă tensiunea are polaritatea din figură şi dacă $i_1 \leqslant i_2$, atunci i_1 se va ramifica prin diodele „deschise" *1* şi *2* şi se va regăsi ca valoare în priza mediană a transformatorului *Tr 2*; circuitul se închide, prin instrumentul indicator, la priza mediană a transformatorului *Tr 1*.

Scanned with OKEN Scanner

Se poate vedea că prin dioda *1* poate circula curentul deoarece $i_2 - \frac{i_1}{2} > 0$, iar prin *2* dioda circulă un curent şi mai mare $i_2 + \frac{i_1}{2}$; diodele *3* şi *4* sînt blocate. Dacă polaritatea se schimbă la ambele transformatoare, atunci curentul va circula prin diodele *3* şi *4*, diodele *1* şi *2* fiind blocate; curentul însă nu-şi va schimba sensul în instrumentul de măsură. Dacă se schimbă polaritatea numai la unul din transformatoare, faţă de cea indicată în fig. 3.52, atunci se inversează sensul curentului care trece prin instrument.

Prin echilibrarea punţii de traductoare, tensiunile aplicate la diagonalele punţii cu diode devin egale, deci curentul prin instrument se anulează. La variaţia tensiunii U_1, tensiunea U_2 dată de oscilator fiind constantă, instrumentul va indica un curent proporţional cu variaţia lui U_1 şi totodată va indica şi sensul de variaţie al acestei tensiuni deci detectorul este sensibil la fază. Din acest motiv instrumentul se realizează ca indicator de nul (cu „zero" la mijlocul scalei de măsură).

d) *Blocul de filtrare* este constituit din mai multe celule de filtrare „trece-jos" şi are rolul de a elimina, după detecţie, oscilaţiile avînd frecvenţa f_0 a purtătoarei şi a armonicelor acesteia: $2f_0$, $3f_0$, etc...

e) *Amplificatorul de putere* este un amplificator de curent continuu realizat în *montaj în contra timp* şi are rolul de a furniza la ieşire un semnal suficient de puternic pentru acţionarea unui inscriptor direct, a unor galvanometre cu oglindă sau a altor dispozitive de înregistrare.

Amplificatoarele tensometrice cu frecvenţă purtătoare prezintă următoarele *avantaje*:

— permit conectarea la intrare a tuturor tipurilor de traductoare pasive (rezistive, inductive şi capacitive);

— tensiunile care apar prin efect termoelectric nu influenţează circuitul de măsură;

— au posibilitatea de a elimina paraziţii industriali care au frecvenţa reţelei de alimentare; sînt eliminate în special efectele provocate de cîmpurile electromagnetice produse de instalaţiile industriale ale căror conductoare electrice prezintă o simetrie faţă de conductorul de punere la pămînt, cum ar fi: motoarele electrice, transformatoarele şi liniile de forţă, instalaţiile de sudură electrică, reţeaua aeriană de alimentare etc;

— au posibilitatea de a separa galvanic circuitul de ieşire faţă de circuitul traductoarelor.

Amplificatoarele tensometrice de curent continuu. La acest tip de amplificatoare puntea de traductoare este alimentată cu curent continuu iar semnalul amplificat este tot un curent continuu a cărui valoare este proporţională cu semnalul dat de traductoare. Acest tip de amplificator este o realizare relativ recentă. Spre deosebire de amplificatoarele cu frecvenţă purtătoare cu care s-au obţinut rezultate bune în exploatare, cu amplificatoarele de curent continuu nu s-au putut efectua măsurări cu rezultate satisfăcătoare. Din acest motiv, astfel de punţi erau foarte puţin utilizate acum cîţiva ani în Europa. Abia după folosirea semiconductoarelor pe scară industrială şi progresele care s-au făcut în acest domeniu, au putut fi realizate amplificatoare de măsură cu circuite imprimate,

tranzistorizate sau cu circuite integrate, cu care s-au obținut rezultate bune, mai bune chiar decît cele obținute cu amplificatoarele cu frecvență purtătoare.

Schema-bloc a acestui tip relativ nou de amplificator tensometric este prezentată în figura 3.53.

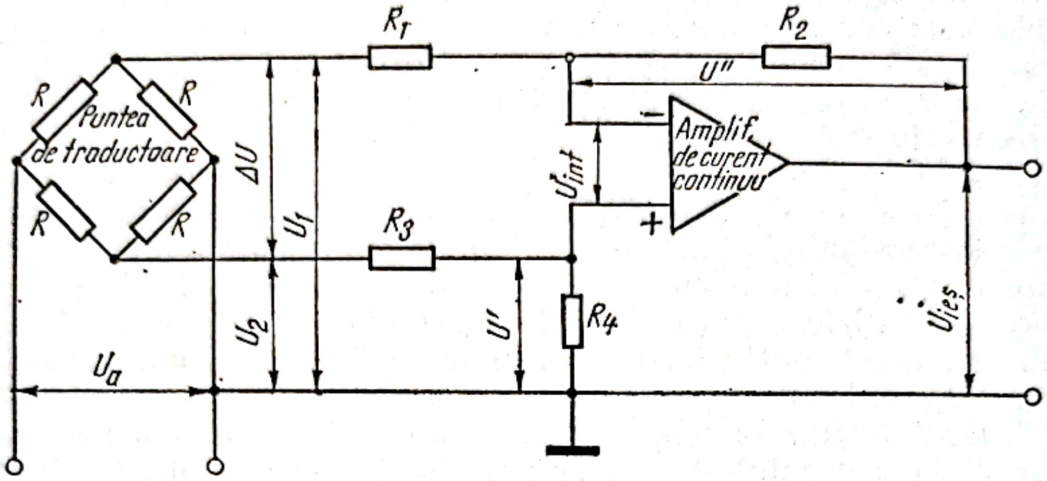


Fig. 3.53.

Puntea de traductoare este alimentată cu curent continuu, la bornele diagonalei de alimentare aplicîndu-se tensiunea U_a. Se presupune (este vorba de cazul ideal) că amplificatorul nu absoarbe curent; rezistențele fixe $R_1 \ldots R_4$ se aleg mult mai mari decît R (rezistența traductorului). În această situație $U_{int} = 0$; rezistențele R_1 și R_2, respectiv R_3 și R_4 constituie două divizoare de tensiune, așa încît se pot scrie relațiile

$$U' = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_2 \tag{3.55}$$

$$U'' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{ieș} - U_1) \tag{3.56}$$

Deoarece, conform ipotezei, $U_{int} = 0$ rezultă că

$$U_{ieș} = U' + U'' = \frac{(R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_1} U_2 - \frac{R_2}{R_1} U_1. \tag{3.57}$$

În montajele uzuale, pentru simetrizare, se alege la proiectare $R_1 = R_3$ și $R_2 = R_4$ așa încît relația (3.57) devine:

$$U_{ieș} = \frac{R_2}{R_1} U_2 - \frac{R_2}{R_1} U_1 = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1). \tag{3.57'}$$

Din figura 3.53 rezultă $\Delta U = U_1 - U_2$ așa încît relația (3.57') se poate scrie sub forma

$$U_{ieș} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \Delta U. \tag{3.58}$$

Scanned with OKEN Scanner

Relaţia (3.58) exprimă proporţionalitatea dintre $U_{ieş}$ şi semnalul ΔU obţinut la bornele diagonalei de măsură a punţii de traductoare. Factorul de proporţionalitate R_2/R_1 rămîne constant pentru un anumit domeniu de măsurare ; dînd diferite valori lui R_2 şi R_1, prin comutarea unor rezistenţe fixe, se obţin diferite domenii de măsură pentru semnalul ΔU care urmează să fie amplificat.

Amplificatorul de curent continuu este realizat ca amplificator de diferenţă în montaj în contra-timp, cu semiconductoare. Acest montaj permite să se obţină, într-o primă aproximaţie, compensarea derivei de zero provocată de semiconductoare. Se amplifică însă diferenţa derivelor şi din acest motiv tranzistoarele sînt cuplate din punct de vedere termic prin montarea lor într-o carcasă capsulată.

Amplificatoarele tensometrice de curent continuu prezintă următoarele *avantaje* :

— realizează o bună compensare a perturbaţiilor provocate de *cîmpurile electrice* exterioare datorită intrării simetrice faţă de pămînt a amplificatorului tensometric. *Cîmpurile magnetice* perturbatoare însă *nu* sînt compensate ;

— prezintă o mare stabilitate a amplificării datorită unei puternice reacţii negative ;

— prezintă, din acelaşi motiv, o liniaritate foarte bună a semnalului de ieşire în ceea ce priveşte variaţia amplitudinii şi frecvenţei semnalului de intrare ;

— au o bandă de trecere foarte largă a blocului amplificator, datorită reacţiei negative foarte puternice, deci oferă posibilitatea amplificării unor fenomene dinamice atît cu frecvenţe foarte mici cît şi foarte mari.

Compensatoarele. Compensatoarele diferă de amplificatoarele tensometrice obişnuite prin aceea că semnalul obţinut la bornele diagonalei de măsură a punţii de traductoare este anulat printr-un alt semnal produs în aparat, astfel că la intrarea etajului de amplificare tensiunea este anulată.

Schema-bloc a unui compensator este prezentată în figura 3.54.

Tensiunea de alimentare generată de oscilator este aplicată prin transformatorul *Tr 1* (cu două înfăşurări secundare simetrice) la două punţi.

Prima punte este o punte de traductoare, iar cea de a doua este o punte de compensare care se află în interiorul aparatului şi este alcătuită din 3 rezistenţe fixe R_1 şi un potenţiometru de echilibrare cuplat mecanic cu un disc gradat. Tensiunile de alimentare U_a ale ambelor punţi sînt egale.

Diagonalele de măsură ale ambelor punţi sînt legate la un amplificator la ieşirea căruia este conectat un instrument indicator de zero. În cazul în care puntea de traductoare se dezechilibrează, la bornele diagonalei de măsură ale acesteia apare o tensiune U_s şi acul instrumentului deviază. Se roteşte potenţiometrul de echilibrare pînă cînd tensiunea U_k de la bornele diagonalei de măsură a punţii de compensare, devine egală cu U_s, astfel încît $U_s - U_k = 0$.

În concluzie, pentru măsurarea mărimilor mecanice cu ajutorul compensatoarelor sînt necesare 2 citiri : una în „stare de referinţă" şi alta în „stare de solicitare". Măsurările se fac deci prin „metoda de zero".

Scanned with OKEN Scanner

Valorile citite nu sînt influenţate nici de variaţia tensiunii de alimentare, nici de variaţia factorului de amplificare. Ele sînt influenţate de raportul dintre tensiunile de alimentare ale celor două punţi ; menţinerea constantă a acestui raport este relativ uşor de realizat. Echilibrarea punţii

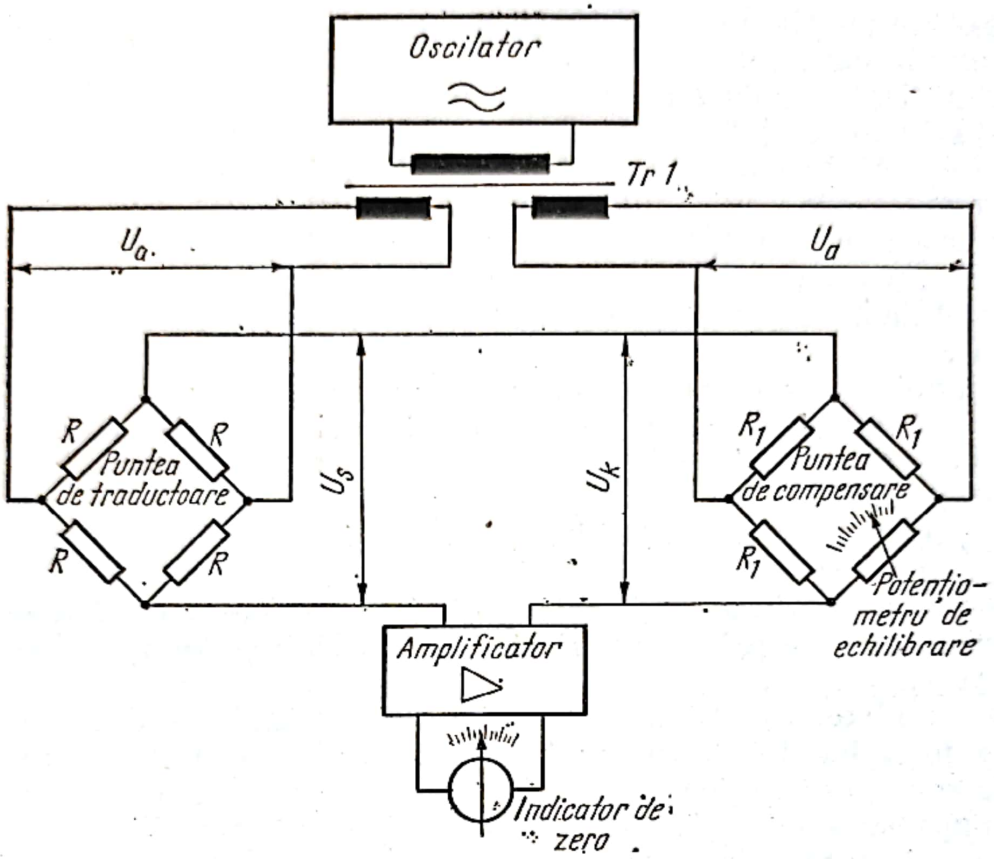


Fig. 3.54.

se face într-un timp destul de lung şi din acest motiv nu se pot măsura fenomene a căror frecvenţă depăşeşte 1 Hz ; deci practic cu compensatoare nu se pot măsura fenomene dinamice.

Observaţie: La unele compensatoare, în locul instrumentului se află montat un servomotor (care îşi schimbă sensul de rotaţie în funcţie de polaritate). Axul servomotorului este cuplat mecanic cu axul potenţiometrului de echilibrare, astfel încît compensatorul se „autoechilibrează". Pe axul comun este montat un ac indicator care se mişcă în faţa unei scale gradate în unităţile mărimii mecanice măsurate. Astfel de compensatoare sînt folosite în instalaţii fixe pentru cîntărire sau pentru stabilirea cantităţii de lichid din rezervoarele de mare capacitate, în care caz cadranul este gradat direct în N, respectiv în litri.

Compensatoarele prezintă următoarele *avantaje* :

— precizie de măsurare foarte mare (prin utilizarea „metodei de zero") ;

— rezultatele nu sînt influenţate de variaţia tensiunii de reţea sau a amplificării ; aceste variaţii influenţează cel mult sensibilitatea aparatului ;

Scanned with OKEN Scanner

— permit automatizarea procesului de măsurare a fenomenelor statice; în schimb *fenomenele dinamice nu se pot măsura cu aceste aparate*;
— permit afişarea numerică (digitală) a valorilor măsurate.

Performanţele amplificatoarelor tensometrice. Pentru a avea o imagine de ansamblu şi pentru a compara mai uşor cele trei tipuri de amplificatoare tensometrice descrise, au fost prezentate într-un tabel (tabelul 3.10) performanţele acestor amplificatoare. Se precizează că nu se poate spune că există un tip mai bun decît altul, ci că un anumit tip poate fi mai adecvat unui anumit fel de măsurare.

3.6.3. DISPOZITIVE DE EVALUARE A MĂRIMII MĂSURATE

Instrumentul indicator. Instrumentul indicator este de tip magnetoelectric. Un astfel de tip este arătat în figura 3.55. S-a ales acest tip deoarece indicaţia (derivaţia unghiulară) este direct proporţională cu curentul pe care-l măsoară instrumentul; deci diviziunile scării vor fi echidistante. Instrumentul se construieşte pentru deviaţii în ambele

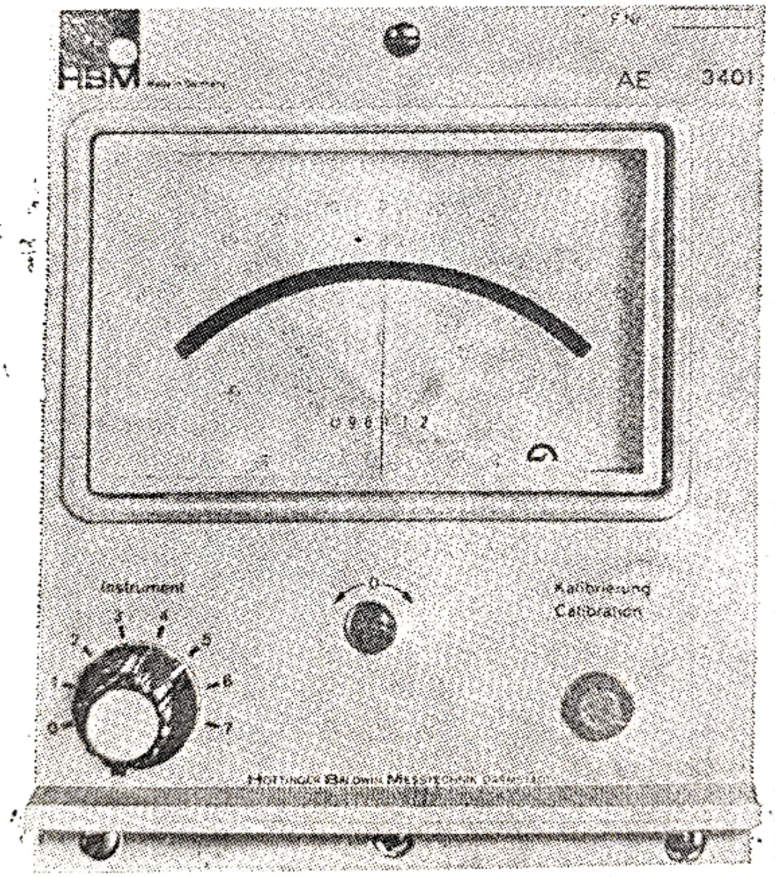


Fig. 3.55.

sensuri (cu diviziunea zero la mijlocul scalei). La aparatele cu citire directă, scala este gradată direct în valori de deformaţie specifică. Sensibilitatea instrumentului este de ordinul zecilor de kΩ/V, ceea ce corespunde unui curent maxim de parcurgere a instrumentului, de ordinul sutelor de μA.

Scanned with OKEN Scanner

Performanţele diferitelor tipuri de amplificatoare tensometrice *Tabelul 3.10*

Caracteristici si parametri			Amplificatoare tensometrice de curent continuu	Amplificatoare tensometrice cu frecvenţă purtătoare			Compensatoare		
				mică (≈ 250 Hz)	medie (≈ 5 kHz)	mare (≈ 50 kHz)	manuale	cu autoechilibrare	
								sistem analogic	sistem digital
Traductoarele care se pot cupla	rezistive		da	da	da	da	da	da	da
	inductive	pasive	nu	nu	da	da	nu	nu	nu
		active	da	nu	da, cu modulator	nu	nu	nu	nu
Parametrii importanţi pt. măsurări statice	stabilitatea pct. de zero		suficientă	f. bună	bună	bună	f. bună	f. bună	f. bună
	stabilitatea amplificării		f. bună	f. bună	suficientă	suficientă	f. bună	f. bună	f. bună
	liniaritatea		f. bună	f. bună	bună	suficientă	f. bună	f. bună	f. bună
	rezoluţia		bună	f. bună	f. bună	bună	f. bună	f. bună	f. bună
Parametrii importanţi pt. măsurări dinamice	banda de trecere		f. largă	îngustă	medie	largă	0	0 ... 1 Hz	0 ... 1 Hz
	redarea impulsurilor		f. bună	nesatisfăcătoare	satisfăcătoare	bună	—	—	—
Influenţe perturbatoare	tens. termoelectrice		influenţează	nu influenţează	nu influenţează	nu influenţează	nu influenţează	nu influenţează	nu influenţează
	paraziţi industriali (reţea)		influenţează	influenţează uneori	nu influenţează	nu influenţează	nu influenţează	uu infineuţează	nu influenţează
	tens. de zgomot (val. relativă)		20	5	2	1	1	1	1
	Capac. cablurilor	încerc. statice	nu influenţează	nu influenţează	infl. ; se poate echilibra	infl. ; se poate echilibra	nu influenţează	nu influenţează	nu influenţează
		încercări dinamice	influenţează	nu influenţează	influenţează f. puţin	influenţează f. puţin	—	—	—

Scanned with OKEN Scanner

Înregistratoare directe (fig. 3.56 şi 3.57). De obicei aceste tipuri de înregistratoare fac parte dintr-o instalaţie completă pentru încercări dinamice, ca de exemplu instalaţia Hottinger Baldwin (inscriptorul He, fig. 3.56 sau Brüel & Kjaer) ; ele nu se realizează ca aparate independente

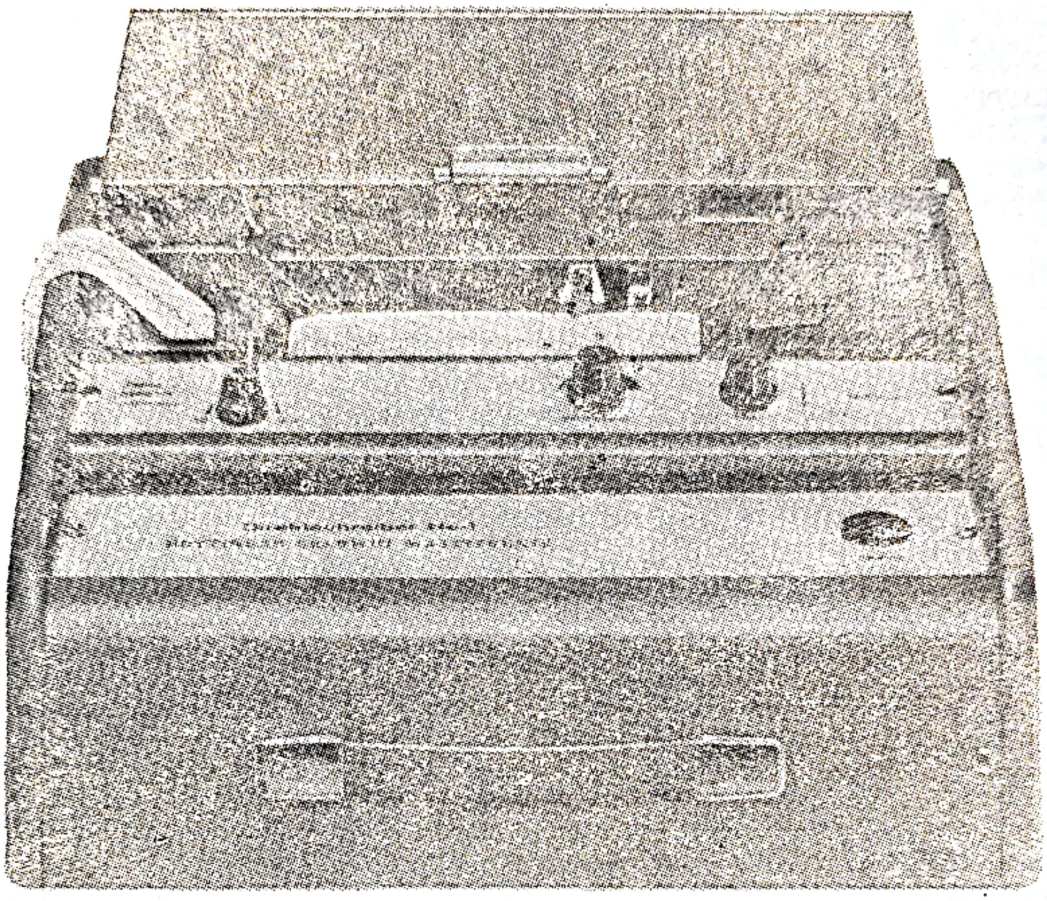


Fig. 3.56.

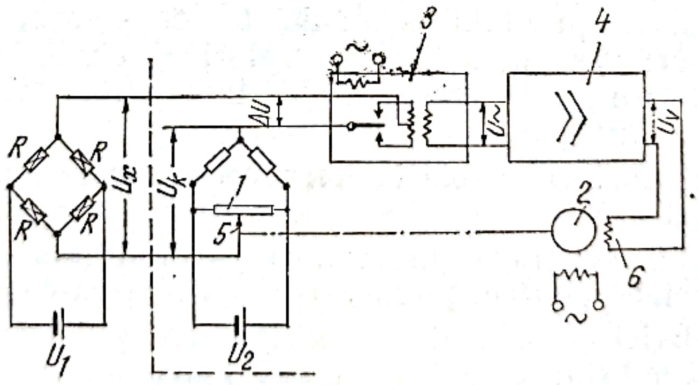


Fig. 3.57.

decît rareori, de exemplu în cazul punţilor alimentate cu curent continuu, sau la măsurarea temperaturilor.

Tensiunea de intrare U_x (fig. 3.57) este aplicată blocului *3* în serie cu o punte formată din două rezistenţe fixe şi un potenţiometru *1*. La

Scanned with OKEN Scanner

una din diagonalele acestei punți se aplică o tensiune continuă U_2, iar la cealaltă diagonală (punctul comun al rezistențelor fixe și cursorul *5* al potențiometrului *1*) rezultă o tensiune de referință U_k.

Pentru a putea fi amplificată cu ușurință tensiunea rezultantă:

$$\Delta U = U_x - U_k$$

este întreruptă periodic cu ajutorul unui vibrator; impulsurile din primarul transformatorului din blocul 3, determină apariția unei tensiuni $U_\sim$ în secundarul transformatorului, a cărei frecvență este determinată de vibrator.

În continuare, tensiunea $U_\sim$ este amplificată în amplificatorul *4*, obținîndu-se la ieșirea acestuia, o tensiune U_v care, la rîndul ei este aplicată înfășurării *6* a unui servomotor *2*.

Rotorul servomotorului *2* este cuplat mecanic cu cursorul *5* al potențiometrului *1*. Sensul de rotație al cursorului depinde de faza tensiunii U_v, deci de polaritatea tensiunii ΔU. Rotorul se va roti antrenînd cursorul *5* pînă la anularea tensiunii U_v, deci pînă cînd *5* se va găsi într-o poziție în care puntea formată din brațele potențiometrului și rezistențele fixe se va echilibra.

Pe cursorul *5* este fixat un ac inscriptor care va trasa o urmă prin zgîriere sau cu cerneală pe o bandă ce se derulează cu o anumită viteză, reglabilă în trepte.

Dacă amplificatorul lucrează liniar, este ușor de văzut că deviațiile acului vor fi proporționale cu tensiunea de intrare U_x, presupunînd U_2 constant.

Deviațiile acului se măsoară față de o „linie de zero" pe care o trasează inscriptorul în lipsa semnalului U_x; poziția acestei linii depinde de valoarea tensiunii constante de referință U_2, care poate fi reglată în trepte și continuu.

Dacă U_x este variabilă în timp (cazul eforturilor dinamice) atunci inscriptorul va trasa pe o hîrtie curbă. Pentru evaluarea eforturilor dinamice se dau în prealabil semnale U_x constante, corespunzătoare unor desechilibrări, proporționale cu valori ε, cunoscute.

Față de celelalte tipuri de aparate de înregistrare, aceste inscriptoare au următoarele avantaje:

— impedanța de intrare relativ mare, deci nu se influențează apreciabil circuitul de măsurat;

— citirea și înregistrarea făcîndu-se direct, nu sînt necesare utilaje și instalații speciale pentru prelucrarea oscilogramelor;

— costul hîrtiei și cernelii este mic în comparație cu cel al hîrtiei fotografice și al substanțelor pentru developarea ei. Se realizează și o economie de manoperă.

Ca dezavantaje sînt de menționat următoarele:

— frecvența de lucru este foarte mică. Cu acest tip de inscriptor se pot măsura fenomene dinamice a căror frecvență nu depășește, în general, 100 Hz. Limitarea superioară a frecvenței se datorește inerției mecanice, care este cauzată de masa relativ mare a inscriptorului (tijă,

Scanned with OKEN Scanner

cursor, rezervor de cerneală), precum și frecărilor (cursor-potențiometru, ac-hîrtie, servomotor-ax etc.);

— costul aparatului este relativ ridicat, în comparație cu cel al oscilografelor magnetice;

— majoritatea inscriptoarelor de acest tip nu se pot utiliza independent, ci numai în instalația cărora aparțin.

Trebuie menționat că înregistrarea se poate face nu numai cu cerneală pe hîrtie obișnuită ci și cu ac pe hîrtie cerată sau cu hîrtie indigo, devenind astfel posibilă înregistrarea fenomenelor cu frecvențe peste 100 Hz, fără a se depăși însă 200 Hz.

Oscilografe magnetice. Oscilografele magnetice se folosesc pentru înregistrarea simultană a mai multor fenomene variabile în timp, periodice sau aperiodice.

Oscilografele magnetice au trei părți principale:
— galvanometrele cu oglindă (buclele)
— sistemul optic (fig. 3.58)
— sistemul mecanic

Pentru fiecare canal se folosește cîte o buclă.

Bucla este de fapt un galvanometru cu oglindă în miniatură. Ea se compune dintr-o bobină *1* prinsă la ambele capete cu ajutorul a două benzi metalice, care constituie în același timp bornele bobinei.

Pe bobină se găsește lipită o oglindă minusculă *2*. Buclele sînt introduse într-un cîmp magnetic foarte puternic creat de un magnet permanent masiv. La trecerea curentului prin bobină aceasta se rotește în cîmpul magnetic cu un unghi α proporțional cu intensitatea curentului. Odată cu bobina se rotește și oglinda. Pe oglindă se reflectă o rază de lumină ce vine de la o sursă *3* (bec incandescent sau fluorescent), astfel că la rotirea oglinzii cu un unghi α, raza reflectată este deviată cu un unghi 2α. Această rază cade pe un tambur *4*, dînd un punct luminos ce impresionează hîrtia fotosensibilă înfășurată pe tambur.

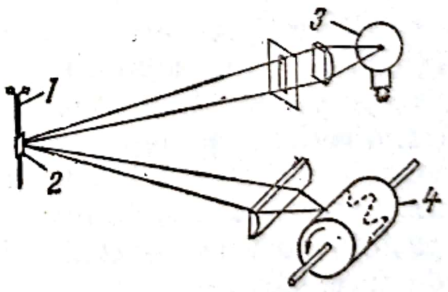


Fig. 3.58.

Avantajele principale ale acestor oscilografe sînt:

— permit înregistrarea simultană a variațiilor din mai multe canale de măsură;

— utilizează în marea majoritate a cazurilor hîrtie fotografică de dimensiuni mari (atît ca lățime cît și ca lungime: circa 20 cm × 30 m), ceea ce permite o evaluare mai precisă a mărimilor măsurate;

— sînt aparate cu volum și greutate mică (raportată la numărul canalelor de înregistrare);

— sînt ușor de întreținut; buclele se pot înlocui mai ușor decît tuburile catodice. În afară de aceasta, în condiții normale de lucru, durata de serviciu a unei bucle este mult mai mare decît a unui tub catodic.

Scanned with OKEN Scanner

Dezavantajele sînt următoarele :

— au inerţie mecanică relativ mare ; nu pot reda fenomene dinamice care au frecvenţe de ordinul miilor de hertzi ;

— au curbă de răspuns neuniformă adică prezintă distorsiuni liniare (de frecvenţă) în jurul frecvenţei proprii (de rezonanţă) a buclei. Din acest motiv, unele galvanometre (bucle) au cadrul mobil cufundat într-un lichid, obţinîndu-se astfel o amortizare a curbei de răspuns ;

— necesită o perfectă adaptare la aparatul de măsură ; neadaptarea (rezistenţa buclei diferită de impedanţa de ieşire a aparatului), duce la apreciabile distorsiuni de frecvenţă. Pentru adaptare, amplificatoarele tensometrice sînt prevăzute la ieşire (ieşirea de „mică impedanţă") cu un potenţiometru de reglare a impedanţei ;

— funcţionează numai cu curent detectat şi absorb energia din circuitul de măsură. Din acest motiv, aparatele de măsură la care se pot conecta oscilografe magnetice au în componenţa lor un etaj amplificator de curent continuu de putere ;

— sînt sensibile la şocuri şi suprasolicitări. Experienţa a arătat că pot interveni erori de înregistrare cauzate de frecarea cadrului mobil de suport, datorită deformării firului de suspensie în urma şocurilor mecanice suferite de aparat. De asemenea, la suprasolicitarea electrică a buclei, firul de suspensie capătă o deformare permanentă prin torsionare, falsificînd rezultatele înregistrare, sau se poate chiar arde. Se impune deci aprecierea curentului corespunzător amplitudinii maxime a fenomenului de măsurat, amplitudine necunoscută iniţial ;

— modificarea sensibilităţii aparatului de înregistrare şi schimbarea gamelor de frecvenţă este incomodă, aceasta fiind posibilă numai prin schimbarea buclei ; intercalarea de rezistenţe (prin şuntare) impune o nouă adaptare a impedanţei de ieşire a amplificatorului tensometric ;

— necesită, ca şi înregistrările cu oscilograful catodic, instalaţii şi utilaj fotografic.

Observaţie. Relativ recent au fost aduse perfecţionări oscilografelor magnetice (de exemplu de firma Honneywell). Sursa de lumină este un tub cu vapori de mercur care produce raze ultraviolete ce impresionează, după reflexia pe oglinda buclei, o hîrtie fotografică specială (sensibilizată pentru radiaţia UV). Oscilogramele apar imediat putînd fi vizualizate direct fără a mai fi necesar vreun tratament chimic. Se creează astfel posibilitatea de a se repeta imediat măsurările la care s-au observat defecte de înregistrare.

Oscilografele magnetice sînt cele mai indicate aparate de înregistrare în cazul măsurărilor dinamice în mai multe puncte simultan şi a căror frecvenţă este de ordinul zecilor sau chiar a sutelor de hertzi. Utilizarea lor este şi mai avantajoasă în cazul folosirii tuburilor cu vapori de mercur şi a hîrtiei sensibilizate pentru UV (înscriere directă).

Aceste oscilografe sînt singurele care pot fi acţionate simultan de mai multe traductoare active (traductoare la care prin variaţia unei mărimi mecanice se obţine energie electrică). Aceste traductoare se leagă direct la oscilograful magnetic, fără a mai fi necesar un amplificator.

Scanned with OKEN Scanner

Oscilografele magnetice nu pot fi utilizate pentru înscrierea eforturilor dinamice a căror frecvenţă este de ordinul 10^3 Hz sau mai mare. De asemenea, oscilografele magnetice nu pot fi legate decît la amplificatoare de curent continuu de putere, a căror impedanţă de ieşire este mică.

Erori, defecţiuni şi înlăturarea lor. a) *Erori de neadaptare.* Deoarece bucla consumă curent, este necesară conectarea buclelor la ieşirea unui amplificator de putere. Condiţia de adaptare impune ca rezistenţa buclei să fie egală cu rezistenţa de ieşire a amplificatorului. În cazul în care aceste două rezistenţe diferă, este necesară adaptarea buclei prin rezistenţe montate în serie şi paralel.

Dacă nu se iau aceste măsuri apar distorsiuni (liniare şi neliniare). Firma Hottinger-Baldwin a întocmit nomograme (vezi fig. 3.59—3.62) cu ajutorul cărora se pot determina rapid rezistenţele necesare adaptării buclelor oscilografelor magnetice atît la amplificatoarele tensometrice produse de această firmă cît şi la alte tipuri de amplificatoare.

b) *Arderea buclelor.* Fiecare buclă poate suporta un curent maxim. În cazul depăşirii acestui curent conductorul bobinei sau benzile metalice de suspensie se pot topi. În acest caz este necesară înlocuirea buclei; „reparaţiile" improvizate nu sînt admise.

c) *Torsionarea benzilor de suspensie.* Deşi buclele suportă un curent I_{max} ele se folosesc pentru curenţi nominali mai mici. În apropierea valorii curentului maxim benzile elastice de suspensie pot căpăta deformaţii permanente. Defectul este iremediabil fiind necesară înlocuirea buclei.

Banda superioară de suspensie poate fi acţionată din exterior printr-un şurub, cu ajutorul unei şurubelniţe, pentru aducerea spotului în poziţia dorită. Se atrage atenţia în mod special că dacă se roteşte prea mult acest şurub, banda se torsionează puternic putînd rămîne cu deformare permanentă. În concluzie acţionarea acestui şurub se va face numai cu oscilograful în funcţiune urmărind ca devierea spotului pe hîrtie să nu întreacă valoarea admisibilă.

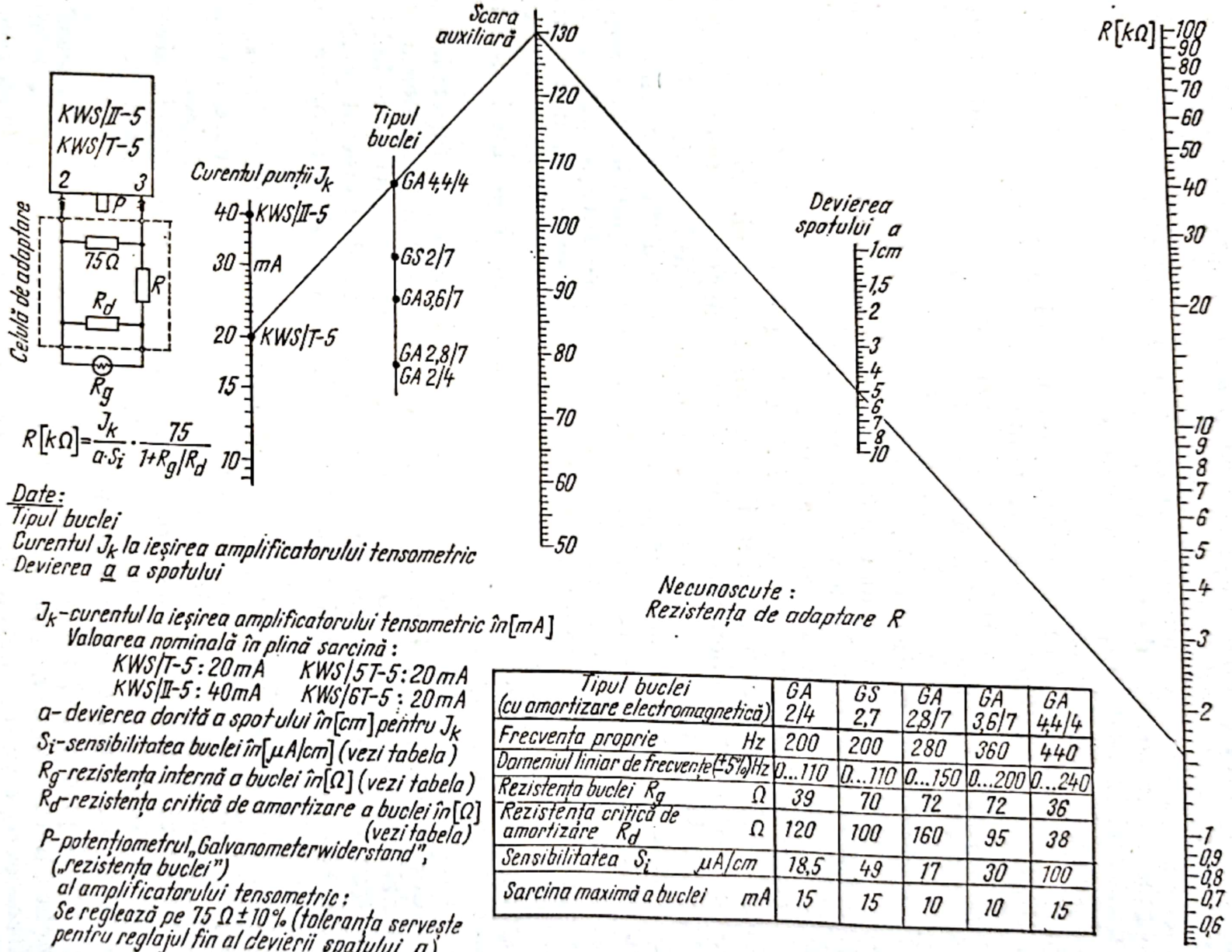
d) *Dezaxări ale bobinelor mobile.* La şocuri mecanice puternice se produc devieri ale axului bobinelor astfel că acesta nu mai coincide cu axul benzilor de suspensie. În acest caz pot să apară frecări între bobine şi pereţii suportului iar oscilograma apare „în trepte". Defectul poate fi remediat readucînd în coincidenţă axul bobinei cu axul benzilor de suspensie.

e) *Erori datorite unei imperfecte etanşări a buclelor cu imersiune.* Pentru liniarizarea curbei de răspuns s-au fabricat bucle care lucrează cufundate într-un lichid, de obicei ulei, care joacă rol de amortizor.

Dacă sînt pierderi de ulei din cauza neetanşeităţii cuvei, nivelul uleiului din cuvă scade şi bineînţeles curba de răspuns capătă cu totul altă alură introducînd erori apreciabile.

Deşi la prima vedere defectul apare uşor remediabil, în practică o asemenea buclă nu se mai poate folosi decît după o remediere la fabrica constructoare, deoarece parametrii buclei (constanta benzilor de suspensie, masa echipamentului mobil, caracteristicile uleiului etc.) constituie un secret de fabricaţie. La introducerea unui alt lichid (chiar ulei) se obţine, firesţe, o altă curbă de răspuns decît cea indicată de fabrică.

Scanned with OKEN Scanner



Date:
Tipul buclei
Curentul J_k la ieșirea amplificatorului tensometric
Devierea a spotului

Necunoscute:
Rezistența de adaptare R

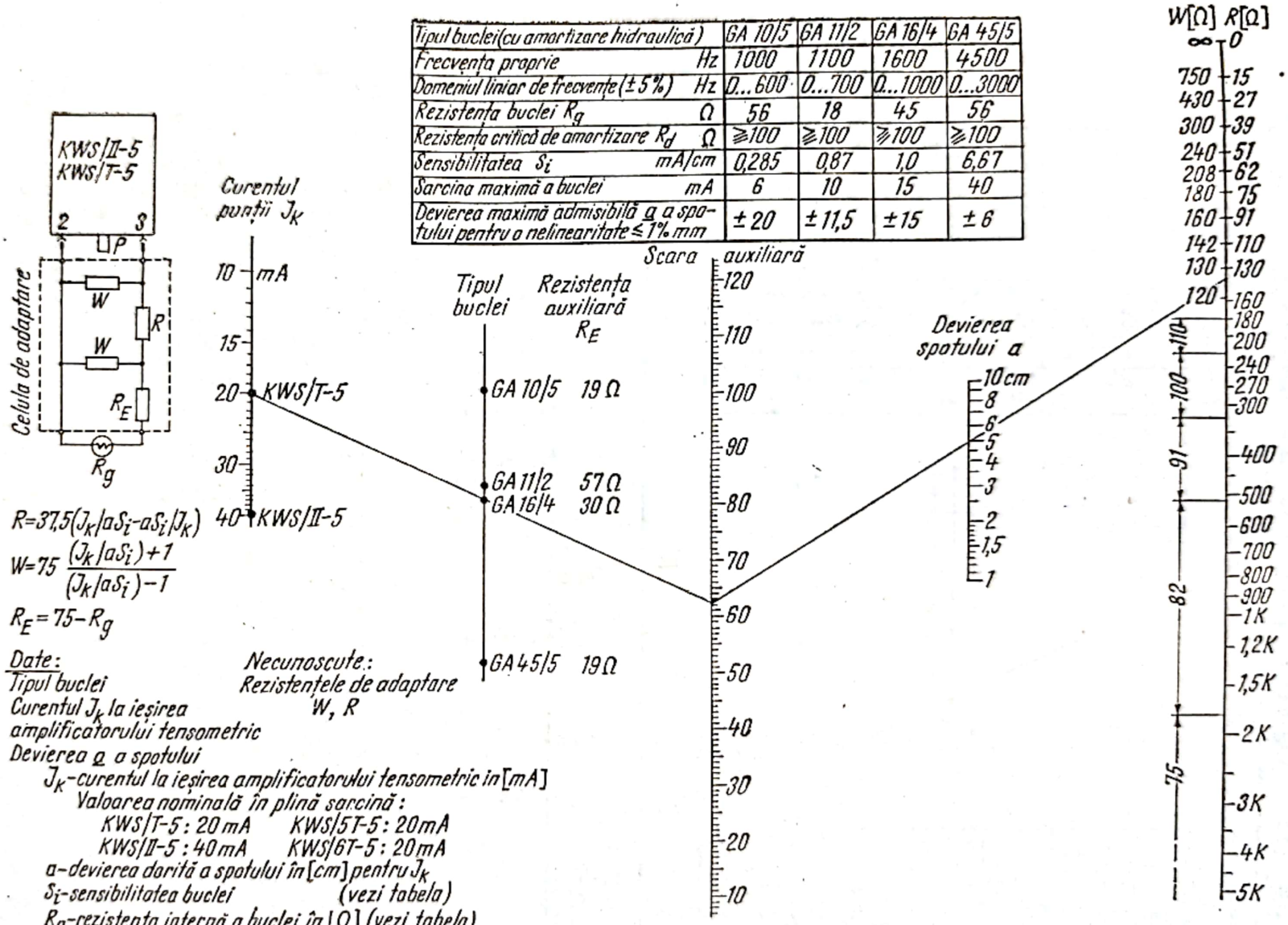
J_k - curentul la ieșirea amplificatorului tensometric în [mA]
Valoarea nominală în plină sarcină:
KWS/T-5: 20mA KWS/5T-5: 20mA
KWS/II-5: 40mA KWS/6T-5: 20mA
a - devierea dorită a spotului în [cm] pentru J_k
S_i - sensibilitatea buclei în [μA/cm] (vezi tabela)
R_g - rezistența internă a buclei în [Ω] (vezi tabela)
R_d - rezistența critică de amortizare a buclei în [Ω] (vezi tabela)
P - potențiometrul „Galvanometerwiderstand", („rezistența buclei") al amplificatorului tensometric:
Se reglează pe 75 Ω ± 10% (toleranța servește pentru reglajul fin al devierii spatului a)

Tipul buclei (cu amortizare electromagnetică)		GA 2/4	GS 2,7	GA 2,8/7	GA 3,6/7	GA 4,4/4
Frecvența proprie	Hz	200	200	280	360	440
Domeniul liniar de frecvențe (±5%)	Hz	0...110	0...110	0...150	0...200	0...240
Rezistența buclei R_g	Ω	39	70	72	72	36
Rezistența critică de amortizare R_d	Ω	120	100	160	95	38
Sensibilitatea S_i	μA/cm	18,5	49	17	30	100
Sarcina maximă a buclei	mA	15	15	10	10	15

Fig. 3.59.

Scanned with OKEN Scanner

Tipul buclei (cu amortizare hidraulică)		GA 10/5	GA 11/2	GA 16/4	GA 45/5
Frecvența proprie	Hz	1000	1100	1600	4500
Domeniul liniar de frecvențe (±5%)	Hz	0...600	0...700	0...1000	0...3000
Rezistența buclei R_g	Ω	56	18	45	56
Rezistența critică de amortizare R_d	Ω	≥100	≥100	≥100	≥100
Sensibilitatea S_i	mA/cm	0,285	0,87	1,0	6,67
Sarcina maximă a buclei	mA	6	10	15	40
Devierea maximă admisibilă $\underline{a}$ a spotului pentru o neliniaritate ≤ 1% mm		± 20	± 11,5	± 15	± 6



$R = 37{,}5(J_k/aS_i - aS_i/J_k)$

$W = 75\,\dfrac{(J_k/aS_i)+1}{(J_k/aS_i)-1}$

$R_E = 75 - R_g$

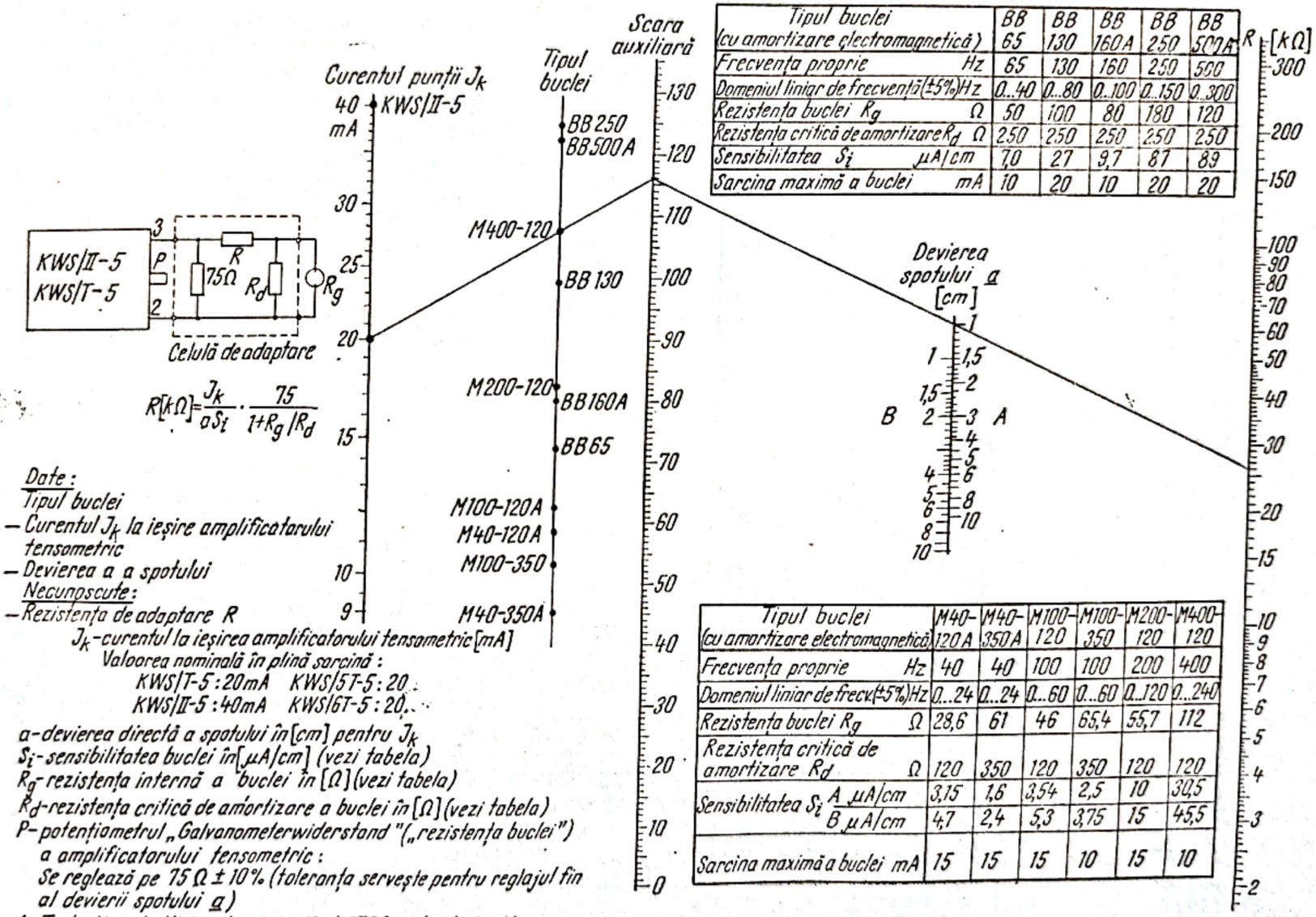
Date:
Tipul buclei
Curentul J_k la ieșirea amplificatorului tensometric
Devierea $\underline{a}$ a spotului

Necunoscute:
Rezistențele de adaptare W, R

J_K - curentul la ieșirea amplificatorului tensometric în [mA]
Valoarea nominală în plină sarcină:
KWS/T-5: 20 mA KWS/5T-5: 20 mA
KWS/II-5: 40 mA KWS/6T-5: 20 mA
a - devierea dorită a spotului în [cm] pentru J_k
S_i - sensibilitatea buclei (vezi tabela)
R_g - rezistența internă a buclei în [Ω] (vezi tabela)
R_E - rezistența adițională $R_E = 75 - R_g$ [Ω] (vezi tabela și nomograma)
P - potențiometrul „Galvanometerwiderstand" („rezistența buclei") al amplificatorului tensometric: se reglează pe 75 Ω ± 10% (toleranța servește pentru reglajul fin al deviației spotului $\underline{a}$)

Fig. 3.60.

Scanned with OKEN Scanner



Tipul buclei (cu amortizare electromagnetică)		BB 65	BB 130	BB 160 A	BB 250	BB 500 A
Frecvența proprie	Hz	65	130	160	250	500
Domeniul liniar de frecvență (±5%)	Hz	0...40	0...80	0...100	0...150	0...300
Rezistența buclei R_g	Ω	50	100	80	180	120
Rezistența critică de amortizare R_d	Ω	250	250	250	250	250
Sensibilitatea S_i	μA/cm	7,0	27	9,7	87	89
Sarcina maximă a buclei	mA	10	20	10	20	20

Tipul buclei (cu amortizare electromagnetică)		M40-120 A	M40-350 A	M100-120	M100-350	M200-120	M400-120
Frecvența proprie	Hz	40	40	100	100	200	400
Domeniul liniar de frecv. (±5%)	Hz	0...24	0...24	0...60	0...60	0...120	0...240
Rezistența buclei R_g	Ω	28,6	61	46	65,4	55,7	112
Rezistența critică de amortizare R_d	Ω	120	350	120	350	120	120
Sensibilitatea S_i A	μA/cm	3,15	1,6	3,54	2,5	10	30,5
Sensibilitatea S_i B	μA/cm	4,7	2,4	5,3	3,75	15	45,5
Sarcina maximă a buclei	mA	15	15	15	10	15	10

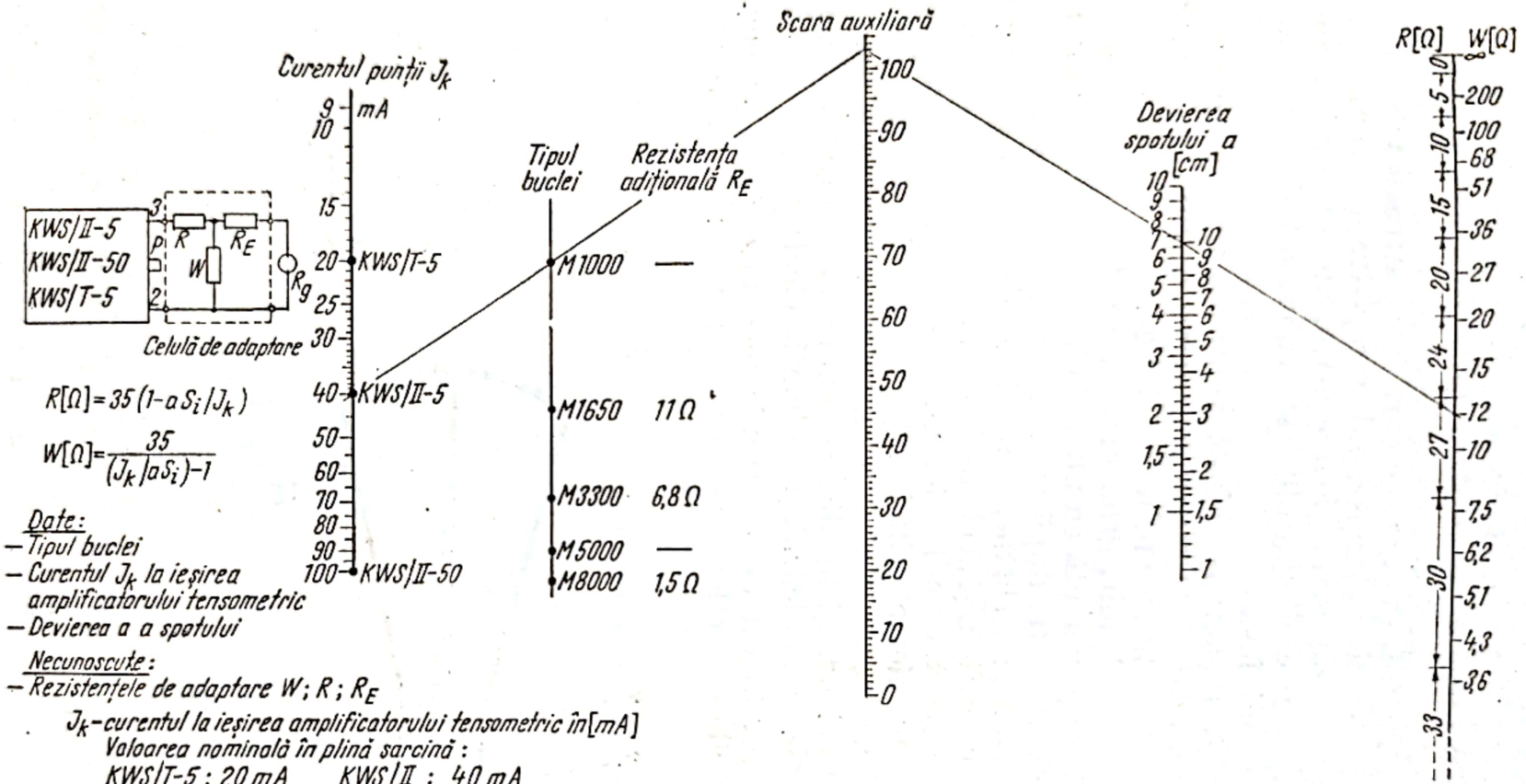
Date:
Tipul buclei
– Curentul J_k la ieșire amplificatorului tensometric
– Devierea a a spotului
Necunoscute:
– Rezistența de adaptare R

J_k – curentul la ieșirea amplificatorului tensometric [mA]
Valoarea nominală în plină sarcină:
KWS/T-5 : 20 mA KWS/5T-5 : 20
KWS/II-5 : 40 mA KWS/6T-5 : 20

a – devierea directă a spotului în [cm] pentru J_k
S_i – sensibilitatea buclei în [μA/cm] (vezi tabela)
R_g – rezistența internă a buclei în [Ω] (vezi tabela)
R_d – rezistența critică de amortizare a buclei în [Ω] (vezi tabela)
P – potențiometrul „Galvanometerwiderstand" („rezistența buclei") a amplificatorului tensometric:
Se reglează pe 75 Ω ± 10% (toleranța servește pentru reglajul fin al devierii spotului a)
A – Toate tipurile Visicorder exceptînd 1706 cu bucle tip M
B – Visicorder 1706 cu bucle tip M

Fig. 3.61.

Scanned with OKEN Scanner



$R[\Omega] = 35\,(1 - a\,S_i/J_k)$

$W[\Omega] = \dfrac{35}{(J_k/aS_i) - 1}$

Date:
- Tipul buclei
- Curentul J_k la ieșirea amplificatorului tensometric
- Deviereа a a spotului

Necunoscute:
- Rezistențele de adaptare W; R; R_E

J_k – curentul la ieșirea amplificatorului tensometric în [mA]
Valoarea nominală în plină sarcină:
KWS/T-5 : 20 mA KWS/II : 40 mA
KWS/5T-5: 20 mA KWS/II-50:100 mA
KWS/6T-5: 20 mA

a – deviereа dorită a spotului în [cm] pentru J_k
S_i – sensibilitatea buclei în [mA/cm] (vezi tabela)
R_g – rezistența internă a buclei în [Ω] (vezi tabela)
R_E – rezistența adițională $R_E = 35 - R_g$ [Ω]
(vezi tabela și nomograma)
P – potențiometrul „Galvanometerwiderstand" („rezistența buclei") al amplificatorului tensometric:
Se reglează pe 35 Ω ± 10% (toleranța servește pentru reglajul fin al deviерii spotului a)
La M 13000 se reglează pe 71 Ω (vezi nota de sub tabel)
A Toate tipurile Visicorder exceptînd 1706 cu bucle tip M
B Visicorder 1706 cu bucle tip M

Tipul buclei (cu amortizare hidraulică)		M1000	M1650	M3300	M5000	M8000	M13000 *
Frecvența proprie	Hz	1000	1650	3300	5000	8000	13000
Domeniul liniar de frecvență (±5%)	Hz	0...600	0...1000	0...2000	0...3000	0...4800	(±8%) 0...13000
Rezistența buclei R_g	Ω	35	24	28,2	35	33,5	71
Rezistența critică de amortizare R_d	Ω	3...100	3...100	3...100	3...100	3...100	3...100
Sensibilitatea S_i	A mA/cm	1,04	3,65	7,9	12,3	15,75	32,7
	B mA/cm	1,55	5,5	11,8	18,5	23,6	49
Sarcina maximă a buclei	mA	100	100	100	100	100	55
Deviereа maximă admisibilă a a spotului pentru o neliniaritate ≦ 2%	A mm	±100	±100	±75	±45	±25	±12,7
	B mm	±60	±60	±50	±30	±17	±8,5

* Bucla M 13000 se leagă fără rezistențe suplimentare, direct la amplificatorul tensometric.

Fig. 3.62.

Scanned with OKEN Scanner

Osciloграfe catodice. *Principiul de funcţionare. Schema bloc.* Osciloграful catodic este un ansamblu cu ajutorul căruia se pot fotografia sau filma fenomene variabile care în prealabil au fost convertite în semnale electrice. Un oscilograf catodic se com pune dintr-un osciloscop şi dintr-un dispozitiv de înregistrare fotografică (aparat fotografic sau camera de filmt).

Spre deosebire de oscilograful magnetic care înregistrează variaţii de intensitate a curentului electric, osciloscopul înregistrează variaţii de tensiune şi, avînd o rezistenţă de intrare foarte mare, nu consumă practic curent. Elementul principal al oscilografului este tubul catodic (fig. 3.63) a cărui descriere se face mai jos :

Un filament bifilar *1*, răsucit în spirală pentru a nu crea cîmpuri perturbatoare, încălzeşte un catod de nichel *2* acoperit cu un strat emisiv de oxizi. Electronii emişi de catod trec prin orificiul grilei *3*. Spre deosebire de grila unui tub electronic obişnuit, grila unui tub catodic are o formă cilindrică fără ochiuri şi este prevăzută cu un orificiu în direcţia ecranului. Din acest motiv ea se mai numeşte, după numele inventatorului, „cilindru Wehnelt". Grila are două roluri : acela de a controla cantitatea de electroni, emişi de catod, ce trece prin orificiu şi acela de a focaliza fluxul de electroni astfel încît secţiunea transversală a fasciculului de electroni să devină aproape punctiformă în apropierea orificiului.

Electronii sînt apoi acceleraţi de către anozii de accelerare *4* şi *5* de formă cilindrică, care asigură şi focalizarea eliminînd electronii marginali. Deci acest grup de electrozi alcătuieşte o lentilă electronică.

În drumul spre ecran, fluxul de electroni trece prin două perechi de plăci de deflexie ; plăcile de deflexie verticală *6* care sînt aşezate ori-

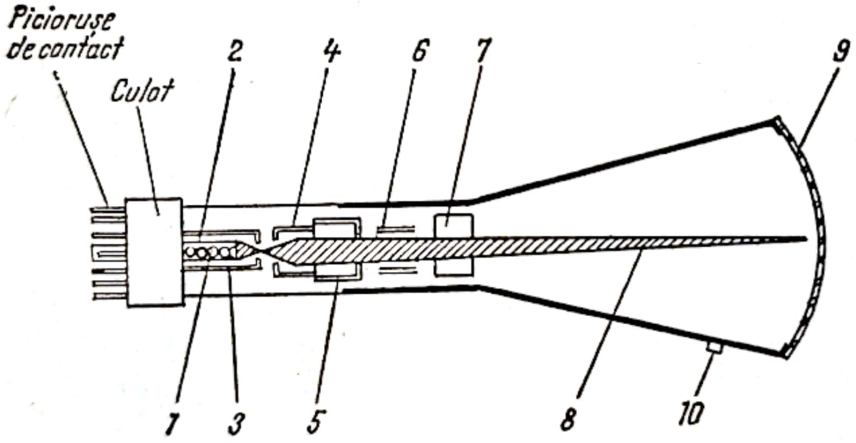


Fig. 3.63.

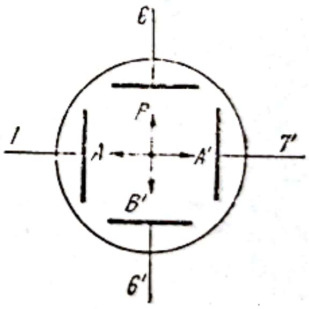


Fig. 3.64.

zontal şi asigură deplasarea pe verticală ($B-B'$) a fasciculului şi plăcile de deflexie orizontală *7* care sînt aşezate vertical şi asigură deplasarea pe orizontală ($A-A'$) a fasciculului (fig. 3.64).

Aceste plăci există la tuburile catodice cu deflexie electrostatică (cele mai des folosite la osciloscoape). Există şi tuburi cu deflexie magnetică ; rolul plăcilor de deflexie îl au în acest caz nişte bobine exterioare tubului.

Scanned with OKEN Scanner

Ansamblul electrozilor amintiţi mai sus poartă numele de „tun electronic". După ce trece prin tunul electronic, fluxul de electroni *8* atinge ecranul *9* acoperit cu o substanţă fosforescentă (luminofor) producînd o pată luminoasă („spot") care, prin focalizare, se poate reduce la un punct.

Luminoforul *nu* conţine fosfor cum greşit se consideră de unii operatori; luminoforul conţine fie Willemit ($ZnO + SiO_2$) pentru culoarea verde, fie sulfură de zinc (ZnS) pentru culoarea albastră. Tot pentru culoarea albastră se pot folosi ecrane cu wolframat de calciu sau de cadmiu.

În cazul folosirii, pentru fotografiere sau filmare, a unui material fotosensibil „ortocromatic" se recomandă ecranele cu sulfură de zinc, iar în cazul folosirii materialelor sensibilizate pancromatic a celor cu Willemit.

În toate cazurile se recomandă ca în instalaţiile electrotensometrice să se folosească ecrane cu persistenţă mare.

Pe tubul catodic se găseşte amplasat un electrod (anodul de postaccelerare) pentru scurgerea electronilor acumulaţi pe ecran; acest electrod fiind sub tensiune înaltă, prezintă un pericol mortal de electrocutare şi trebuie luate măsuri speciale de protecţie.

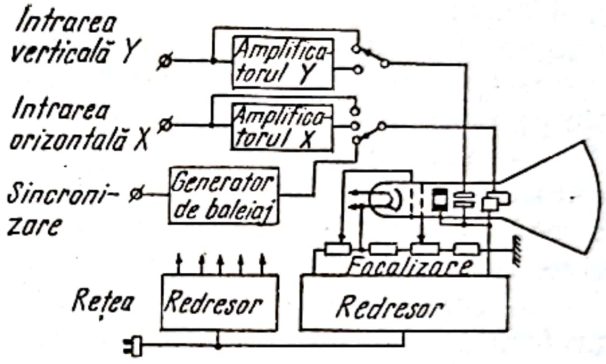


Fig. 3.65.

Schema bloc a unui osciloscop catodic este arătată în figura 3.65.

Aşa cum reiese din această figură, semnalul de vizualizat se aplică plăcilor de deflexie verticală iar tensiunea de la generatorul de baleiaj (baza de timp) se aplică plăcilor de deflexie orizontală. Tensiunea de baleiaj are forma unor „dinţi de ferăstrău" (fig. 3.66); în timpul creşterii ei

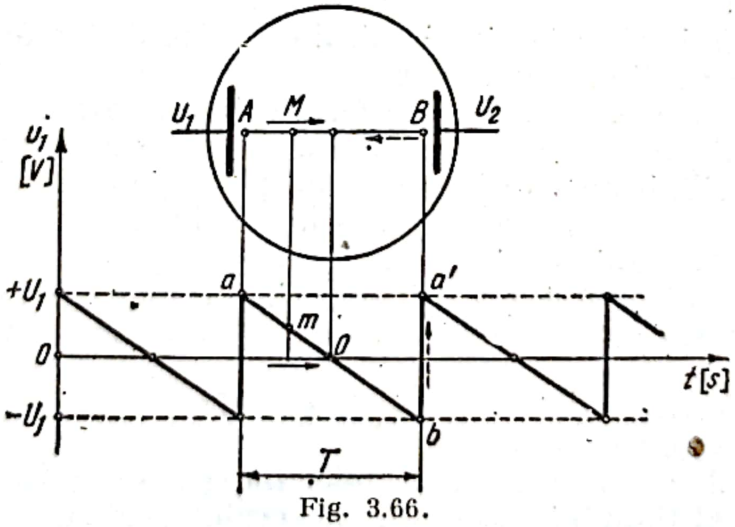


Fig. 3.66.

spotul deviază uniform de la stînga spre dreapta, iar în momentul în care tensiunea scade brusc spotul revine rapid spre stînga, acest ciclu repetîndu-se periodic pentru fiecare dinte. În consecinţă, dacă frecvenţa tensiunii de baleiaj este egală cu frecvenţa fenomenului măsurat, pe ecran

Scanned with OKEN Scanner

se obţine o imagine fixă corespunzătoare unei perioade a fenomenului măsurat. În cazul în care frecvenţa tensiunii de măsurat este un multiplu întreg n al frecvenţei de baleiaj, pe ecranul tubului catodic vor apare nemişcate n perioade ale tensiunii de măsurat. Aceasta constituie una din metodele de măsurare a frecvenţei fenomenelor dinamice.

Osciloscopul este prevăzut cu un dispozitiv pentru ataşarea aparatului de filmat sau de fotografiat ecranul tubului catodic. Aparatul de filmat se deosebeşte de cele obişnuite prin aceea că are punerea la punct fixă (pentru distanţa la ecran) şi nu are obturator. El are un dispozitiv de marcare optică a timpului şi permite filmări cu diferite viteze.

Particularităţile osciloscopului folosit la măsurători tensometrice. Osciloscopul folosit pentru înregistrări tensometrice dinamice are unele particularităţi care îl deosebesc de osciloscoapele obişnuite. Aceste particularităţi sînt:

— frecvenţa de lucru foarte joasă;

— posibilitatea de a scoate din funcţiune baleiajul orizontal (baza de timp) pentru filmare;

— posibilitatea de a înregistra fenomene dinamice de foarte scurtă durată (şocuri). Aceasta se realizează printr-un singur baleiaj al spotului, în care scop aparatul este prevăzut cu un comutator al circuitelor respective din blocul de baleiaj;

— remanenţa mare a ecranului tubului catodic; acest ecran este de preferinţă de *culoare albastră*, culoare pentru care sînt sensibile toate tipurile de filme.

Avantajele şi dezavantajele oscilografelor catodice. Faţă de alte tipuri de aparate de înregistrare, oscilografele catodice au următoarele avantaje:

— sînt practic lipsite de inerţie, astfel că pot reproduce fenomene avînd frecvenţe de la cîţiva herzi pînă la cîţiva kilohertzi;

— nu necesită precauţii deosebite la transport, în comparaţie cu celelalte tipuri;

— consumul de energie din circuitul de măsură este foarte redus, impedanţa de intrare fiind foarte mare;

— sensibilitatea poate fi reglată foarte simplu într-un domeniu mare, cu ajutorul unui atenuator în decade; de asemenea se poate realiza un reglaj fin al sensibilităţii cu ajutorul unui potenţiometru.

Dezavantajele acestor oscilografe sînt următoarele:

— aparataj voluminos şi greu;

— se realizează de obicei pentru un singur spot, deci nu se pot înregistra variaţiile sesizate de mai multe traductoare simultan, ci numai succesiv;

— este necesară folosirea unui film de format mic cu sensibilitate mare (minimum 21/10° DIN);

— precizia de evaluare a rezultatelor înregistrate este redusă datorită formatului mic al filmului. La măriri puternice evaluarea este îngreuiată datorită apariţiei granulaţiei filmului, granulaţie care creşte o dată cu sensibilitatea filmului;

— necesită instalaţii şi utilaj auxiliar (cameră obscură, băi de developare, aparate de mărit şi reprodus etc.).

Scanned with OKEN Scanner

Avînd în vedere atît avantajele cît și dezavantajele oscilografelor catodice se pot trage următoarele concluzii :

— oscilografele catodice sînt cele mai adecvate aparate de înregistrare pentru fenomene dinamice cu frecvențe mari ;

— oscilografele catodice sînt cele mai sensibile aparate (avînd amplificare proprie) și cu posibilități de reglare a sensibilității în limite largi. Consumul de energie din circuitul de măsură este foarte redus. Ele se conectează înaintea detectorului sensibil la fază, deci se poate filma numai cu un *dezechilibru inițial* al amplificatorului tensometric.

Observație. Ținînd seama de avantajele oscilografului catodic, unele firme au realizat aparate de înregistrare cu mai multe tuburi catodice de dimensiuni mici, devenind astfel posibilă înregistrarea simultană a mai multor variabile.

S-au realizat de asemenea osciloscoape cu mai multe spoturi sau cu spoturi comutate electronic într-un timp foarte scurt, care permit vizualizarea și înregistrarea simultană a mai multor fenomene.

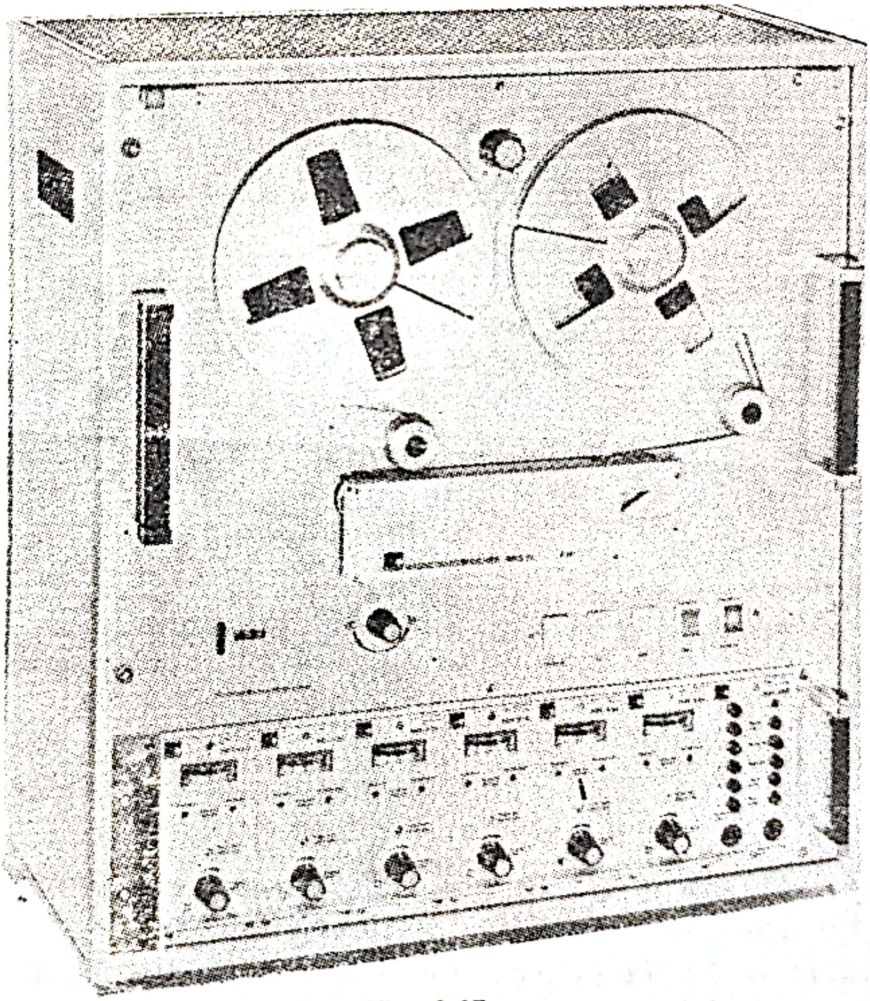


Fig. 3.67.

Alte dispozitive de evaluare. În cele ce urmează sînt enumerate dispozitivele apărute relativ recent :

— *magnetofon* pentru înregistrarea și stocarea datelor măsurate (fig. 3.67) ; înregistrarea se face pe mai multe piste prin procedeul modulației

Scanned with OKEN Scanner

de frecvenţă; vitezele de înregistrare se pot schimba în funcţie de frecvenţa fenomenului de înregistrat; practic pot fi înregistrate fenomene a căror frecvenţă variază între 0 şi ~ 5 kHz.

— *traductor de cod*, pentru acţionarea unui perforator de bandă într-un cod stabilit sau pentru acţionarea unei imprimante (fig. 3.68);

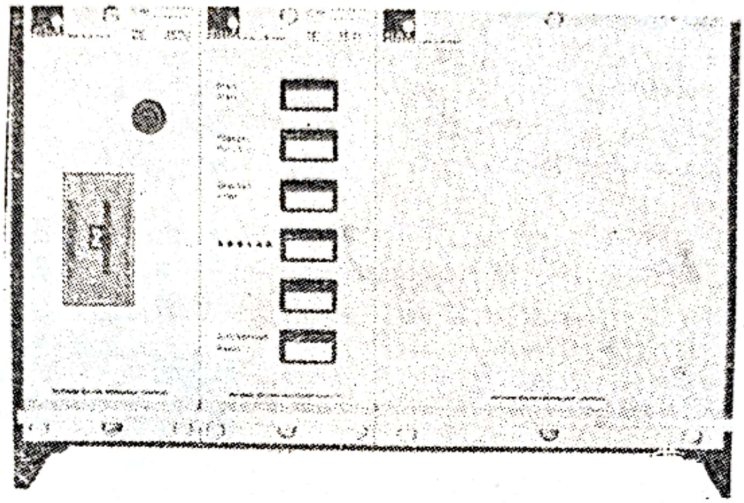


Fig. 3.68.

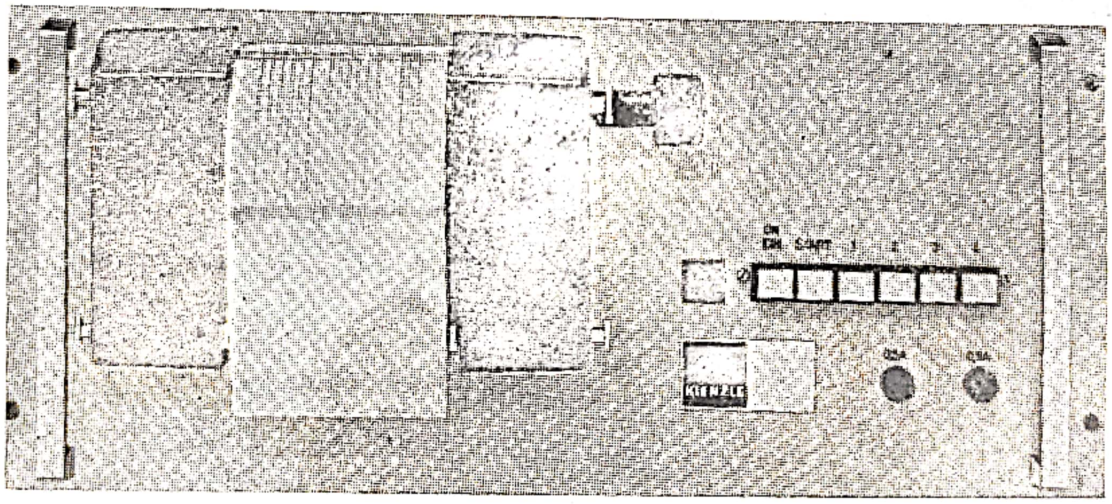


Fig.3.69.

— *imprimantă* pentru înscrierea rezultatelor măsurărilor efectuate cu o instalaţie tensometrică digitală (figura 3.69);

— *perforator de bandă* pentru înregistrarea pe bandă a rezultatelor în vederea prelucrării lor pe calculatoarele electronice (fig. 3.70);

— *inscriptor* $X - Y$ (fig. 3.71) pentru înregistrarea directă a unor funcţii măsurate; în componenţa lor intră două amplificatoare (unul pentru axa OX şi altul pentru axa OY) care acţionează, prin intermediul unor servomotoare, sistemul de scriere (vezi „compensatoare");

Scanned with OKEN Scanner

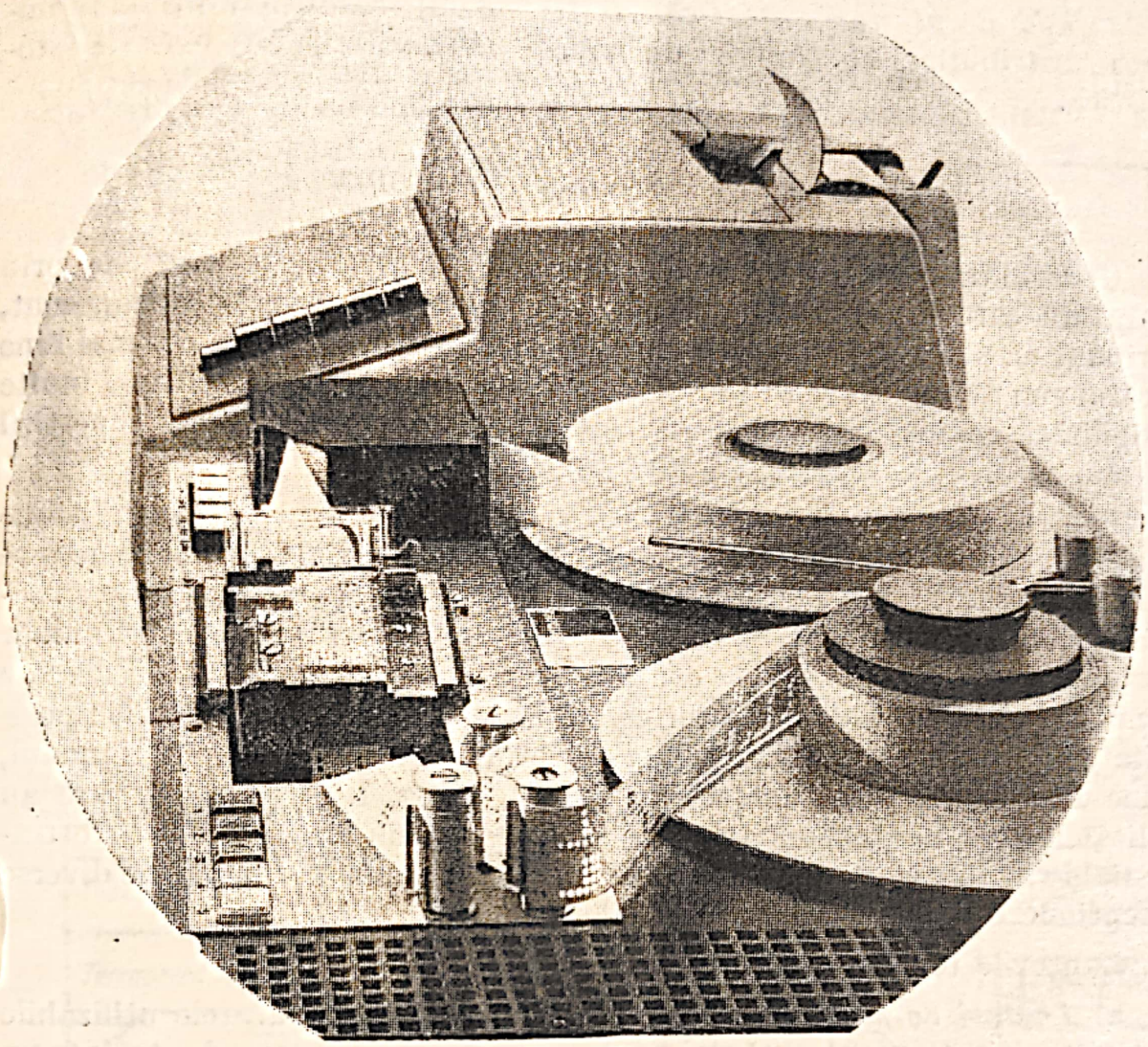


Fig. 3.70.

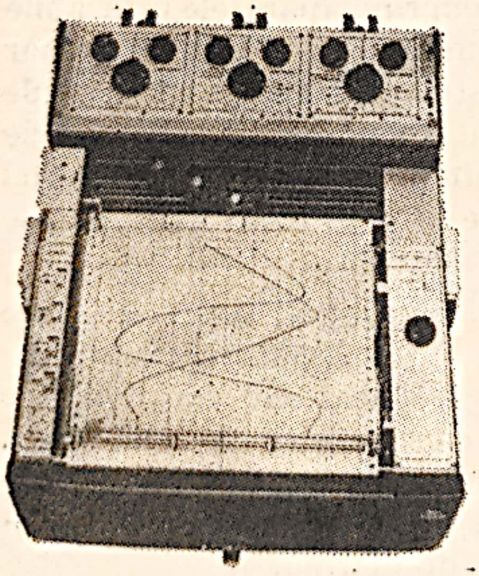


Fig. 3.71.

Fig. 3.72.

— *aparat pentru sortat valori* (fig. 3.72) care permite determinarea distribuţiei mulţimilor de valori la oscilaţii cu variaţie stochastică.

3.6.4. TIPURI DE LANŢURI TENSOMETRICE

Generalităţi. Lanţurile tensometrice pot diferi mult între ele prin aparatura care intră în componenţa lor. Această aparatură a cunoscut, la rîndul ei, o mare diversificare pentru a o face adaptabilă cît mai bine fiecărui gen de măsurare în parte. Ca urmare, pentru a avea cît mai multe posibilităţi de măsurare, utilizatorul se vede obligat să facă investiţii tot mai mari în aparatură cît mai diversă.

Pentru a se reduce aceste investiţii, fără a se reduce şi posibilităţile de măsurare, s-a aplicat şi în domeniul tensometriei electrice ideea de a se realiza aparatajul sub formă de module, care prezintă următoarele avantaje principale: posibilitatea de a se realiza cu toate modulele un număr foarte mare de combinaţii (de ordinul miilor), astfel că pentru fiecare caz de măsurare se pot găsi mai multe combinaţii adecvate de module; posibilitatea de remediere rapidă a unei defecţiuni prin înlocuirea unui modul, în loc de a repara sau a înlocui un aparat întreg. Dintre firmele care au realizat instalaţiile tensometrice sub această formă citäm firma „Hottinger-Baldwin" ale cărei aparate sînt utilizate într-un mare număr de diverse întreprinderi şi institute din ţară.

Lanţurile tensometrice pot fi clasificate astfel:

a) *Lanţuri de măsură „universale"* care cuprind aparatele utilizabile la mai multie tipuri de măsurări. Aceste aparate se pot adapta într-un timp relativ scurt de la un gen de măsurări la altul. Aparatele ce compun instalaţia sînt portabile.

b) *Lanţuri de măsură pentru standuri* care cuprind aparatele utilizabile pentru măsurarea unui număr mic de mărimi mecanice dar într-un număr foarte mare de puncte. Aparatele sînt realizate sub forma unor module care se asamblează în „dulapuri"; ele sînt interschimbabile şi lanţul de măsură se poate oricînd completa cu alte module. Se poate realiza astfel cu un număr de module un număr foarte mare de combinaţii. Instalaţiile sînt stabile şi se utilizează la standurile de măsurări.

c) *Lanţuri de măsură pentru supraveghere şi control.* Aparatele care compun lanţul de măsură sînt stabile şi se montează pentru timp îndelungat la elementul care urmează să fie supravegheat sau controlat (de ex.: deformaţiile rezervoarelor, a elementelor constructive ale unui tunel, presiunea din recipienţi etc.). La depăşirea anumitor limite dinainte stabilite, amplificatorul tensometric poate declanşa fie un dispozitiv de semnalizare optică sau acustică, fie un dispozitiv de alarmă.

Scanned with OKEN Scanner

Lanţuri de măsură universale. Lanţurile de măsură universale, produse de diferite firme, sînt prezentate în tabelul 3.11.

Aşa cum s-a menţionat la începutul acestui paragraf, firma Hottinger Baldwin a produs o nouă generaţie de amplificatoare tensometrice. Aceste

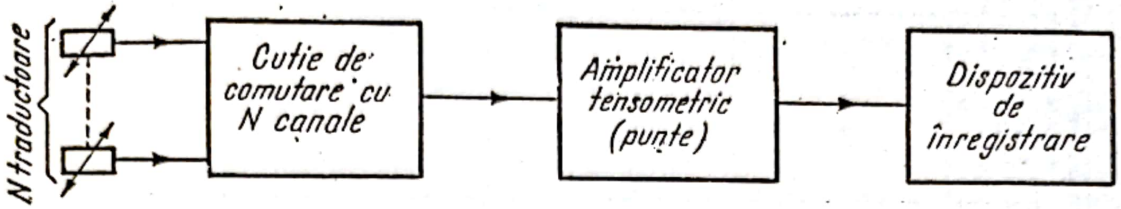


Fig. 3.73.

aparate sînt prezentate în tabelul 3.12. Tipurile încercuite reprezintă aparate de performanţă; tipurile de aparate care se termină cu litera Z pot fi completate cu module suplimentare recomandate în prospectele firmei. Alte detalii pot fi găsite de asemenea în aceste prospecte.

Lanţuri de măsură pentru standuri. Aşa cum s-a arătat mai înainte, combinînd mai multe module se pot asambla instalaţii adecvate oricărui scop de cercetare sau măsurare.

Astfel de combinaţii posibile sînt arătate în fig. 3.74.

Trebuie să se aibă în vedere încă de la început că asemenea instalaţii nu sînt justificate decît dacă măsurările se efectuează într-un număr relativ mare de puncte.

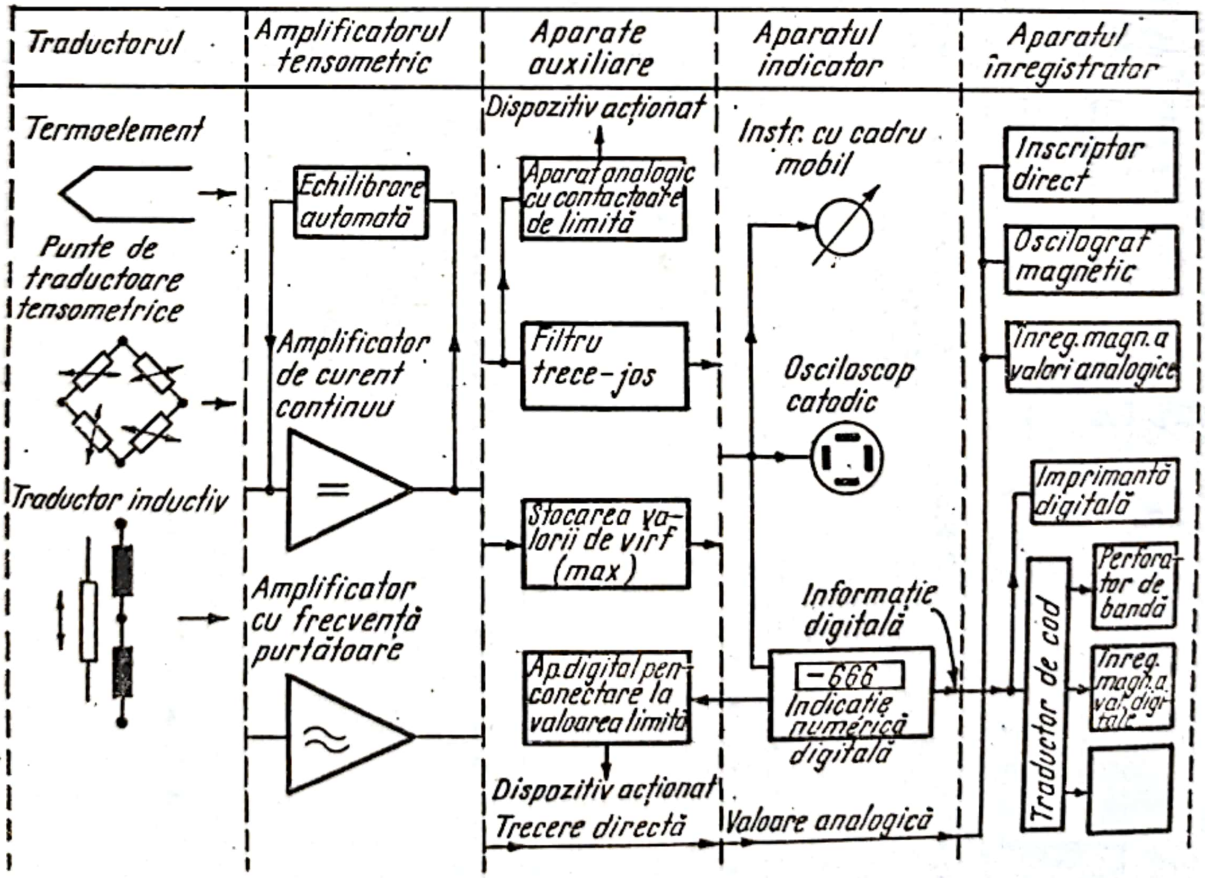


Fig. 3.74.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.11

Lanțuri de măsură universale

Firma	Țara	Dispozitivul de comutare a traductoarelor	Amplificatorul tensometric	Dispozitive care se pot conecta la ieșirea amplificatorului		
				Osciloscop catodic	Oscilograf magnetic	Alte dispozitive
1	2	3	4	5	6	7
ORION	R.P.U.	RZ—004 comutare manuală cu 12 canale	RZ 007 R_t = 120 ... 600 Ω f_0 = 2 kHz Static: met. de zero Dinamic: 0 ... 400 Hz Alimentare: B	da	—	—
HUGGENBERGER	Elveția	K. 23 comutare manuală cu 23 canale	IT 1; fără echilibrare de fază R_t = 100 ... 1000 Ω f_0 = 1 kHz Static: met. de zero Dinamic: 0 ... 200 Hz. Alimentare: R sau B	da	da	—
BRÜEL & KJAER	Danemarca	1542 comutator automat sau manual pentru 1543 cutia de comutare cu 20 canale Cu 1542 se pot comuta 50 canale	1526; cu afișare numerică R_t = 120, 350, 600, 2000 Ω f_0 = 3 kHz Static: citire directă Dinamic: 0 ... 300 Hz Alimentare: R	da	—	Inscriptor direct 2307
RFT „Otto Schön"	R.D.G.	UMM 161 comutator manual cu 6 canale	UM 111; punte cu 1 canal ptr. trad. ind. și rezist. f_0 = 5 kHz Static: citire directă Dinamic: 0 ... 1200 Hz Alimentare: *R* sau *B*	da	da	da

Scanned with OKEN Scanner

RFT „Otto Schön"	R.D.G.	fără comutator: 3 canale sau AG 111 comut. manuală cu 10 canale sau AG 131 comut. manuală cu 30 canale sau MU 121 comut. autom. cu 20 canale	UM 131; punte cu 3 canale (caracteristici. ca la UM 111)	da	da; înregistr. pe 3 canale simultan; se recomandă: 8LS—1 (8 canale) 8LS—201 (8 canale cu U.V.) 12LS—1 (12 canale cu U.V.)	da
IEMI	R.S.R.	N—2304	N—2302; cu 6 canale R_t = 60 ... 1000Ω; f_0 = 5 kHz Static: citire directă Dinamic: 0 ... 1000 Hz Alimentare: R sau B	da	da (înregistrare simultană pe 6 canale)	da (pt. magnetofon sau alte dispoz. de înregistrare)
IEMI	R.S.R.	N—2304	N—2301; cu 1 canal, în rest, aceleași caracteristici ca la N—2302	da	da	da
VISHAY	S.U.A. R.F.G.	SB—1 sau SB—2 comutare manuală cu 10 canale	P—350 A; cu oscil. dreptunghiulare R_t = 120 sau 350 Ω Static: met. de zero Dinamic: 0 ... 60 Hz Alimentare: R sau B	da	da	da

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.11. (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
PEEKEL	Olanda	48 U cu 48 canale	T 200; numai pt. măsurări statice: cu met. de zero $f_0 = 1$ kHz $R_t = 120\ \Omega$: Alimentare: B (cu încărcare de la rețea)	—	—	—
HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK	R.F.G.	US 100 St.; comutare manuală sau automată pt: UD 10 (cu 10 canale sau UMG 23/01 cu 10 canale sau UMG 21/01 cu 20 canale Cu US 100 St. se pot comuta 100 canale	KWS/T — 5 $R_t = 120 \ldots 1200\ \Omega$; $f_0 = 5$kHz Static: citire directă Dinamic: 0 ... 1300 Hz Trad.: R_t sau/și I Alimentare: R sau B	da	da	da
HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK	R.F.G.	ca mai sus	KWS/II—50 $R_t = 120 \ldots 600\Omega$ $f_0 = 50$ kHz Static: citire directă Dinamic: 0...13 kHz Trad. rezistiv sau/și inductiv Alimentare: R	da	da	da
HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK	R.F.G.	—	KWS/6A—5; punte cu 6 canale $R_t = 40 \ldots 1200\Omega$ $f_0 = 5$ kHz Static: citire directă Dinamic 0 ... 1500 Hz Trad.: rezistiv sau/și inductiv Alimentare: R sau B	da	da (înreg. pe 6 canale simultan)	da

Scanned with OKEN Scanner

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK	R.F.G.	fără comutator: 4 canale sau UM 74/20 : 74 canale și 20 trad. de compensare	MK — compensator pentru 4 canale cu instrument indicator; $f_0 = 180$ Hz $R_t = 100 \ldots 2000\ \Omega$ Alimentare: B	—	—	—
HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK	R.F.G.	US 100 St; comutare manuală sau automată pentru UG 50/2 (cu 50 canale) Cu US 100 St. se pot comuta 100 canale	DDM 4 — compensator cu afișare numerică $R_t = 120$; 350 și 600 Ω Alimentare: R	—	—	Imprimanta KIENZLE
HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK	R.F.G.	UMK comutator manual (cu 10 canale și 10 trad de. comp.)	MKT — compensator cu instrument indicator $R_t = 120 \ldots 600\ \Omega$ Alimentare: B	—	—	—

Observații: 1. S-a notat cu f_0 — frecvența purtătoare; R — alimentare la rețea; B — alimentare din baterii și/sau acumulatoare
R_t — rezistența traductorului.

Scanned with OKEN Scanner

Familia de aparate și domeniul de aplicare	Compensatoare (225 Hz) și ampl. cu frecv. purtătoare. Stabilitate f. mare în timp și rezoluție f. mare. Insensibile la cîmpuri perturbatoare exterioare, tensiuni electrochimice și termoelectrice			Amplificatoare tensometrice cu Circuitul de măsură nu este influențat rioare, tensiuni electrochimice și termoelectrice		
Domeniul de frecvențe	0 (cvasistatice)	0 ... 9 Hz		0 ..... 500 Hz		
Traductoare care se pot conecta	Rezistive în punte completă	rezistive în punte completă sau 1/2 punte	rezistive în punte completă	inductive	rezistive în punte completă sau 1/2 punte; inductive	
Reglarea	–	cu butoane	semireglaje	semireglaje	cu butoane	semireglaje
Grupa de aparate și destinația	Clasa de prec. 0,005. Valori: 0 .... 100000 Tarare automată. Pt. măsurări de precizie a forțelor; cîntare	KWS50. Cl. de precizie 0,05 Nu este necesară echilibrare de fază. Plajă mare de echilibrare. Posib. de reglare a factorului *k*	MG 50. Cl. de precizie 0,05. Nu este neces. echilibr. de fază. 3 dom. de măsură. Pt. măs. forțelor și nivelului în rezerv.	MG 61. Cl. de precizie 0,5. Pt. măs. industriale. Pt. instal. de supraveghere și control	KWS72 Cl. de precizie 0,1. Aparate *universale*. Insensibile la paraziții industriali și var. tensiunii din rețea	MG 72 Cl. de precizie 0,1 Pt. instal. de încercări de orice tip Insensibile la paraziții ind. și var. tensiunii din rețea
Tipurile de aparate și modul de indicare a valorii măsurate — Cu instr. indicator	–	KWS 50.A6.Z KWS 350.A7	MG 50.A8.Z MG 50. A9.Z MG 50.A6.Z *MG 50.G1.Z*	MG. 61.A8.Z *MG. 61.A9.Z* MG. 61.A6.Z MG. 61.G1.Z	*KWS 72.A6.Z* *KWS 672.A7*	MG 72.A8.Z MG 72.A9.Z MG 72.A6.Z *MG 72.G1.Z*
Tipurile de aparate și modul de indicare a valorii măsurate — Cu afișare numerică	*DK37A*	*KWS 50D5.Z* *KWS 350.D8*	*MG 50.D5.Z*	–	KWS 72.D5.2 KWS 672.D8	MG 72.D5.Z

Criteriile de alegere a modulelor pentru realizarea unei asemenea instalații trebuie luate în considerare în ordinea indicată în fig. 3.75.

Relativ la *echilibrarea în starea inițială* se pot trage următoarele concluzii de ordin practic:

a) echilibrarea la zero *nu este necesară* la măsurările statice care se efectuează într-un timp relativ mare; trebuie notate însă valorile citite în starea inițială pentru a fi scăzute din valorile citite în starea solicitată a piesei de măsurat;

b) echilibrarea la zero *efectuată continuu* se face cu un potențiometru (de reglaj fin) și prezintă următoarele avantaje:

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.1

frecvență purtătoare (5kHz) de semnalele perturbatoare exte- Aparate „universale" de măsură		Amplificator de curent continuu. Domeniu mare de frecvențe. Redarea f. b. a impulsurilor. Liniaritate f.b. Amplificarea f. constantă		Punți pt. măs. *mom. de torsiune* cu captoare de torsiune (T3F) sau traduct. cu reluctanță (BLM)	Punți pt. măs. *turației* cu captoare de tors. (T3FN) și ampl. de impuls. (DV2556)	Punți pt. măs. *puterii*
0 ..... 1500 Hz		0 ..... 10000 Hz		0 ..... 1200 Hz	30 ... 20000 rot/min.	
rezistive în punte completă sau semipunte; inductive		rezistive în punte completă sau semipunte; trad. active		T3F; T3FN; EV 2510	T3FN; DV 2556	
cu butoane		cu butoane	semireglaje	cu butoane	cu butoane	cu butoane
KWS 82. Cl de preciz. 0,1. Plajă mare de echilibrare. Adecvate pentru măsurări cu trad. rezistive Consum redus	KWS 80. Cl. de precizie 0,1. Ap. de măs. universale. f. comode. Nu necesită echil. de fază. Posib. de reglare a fact. *k*	KWS 20. Cl. de precizie 0,1. Adecvate în spec. pt. măs. frecv. mari (ex.; vibrații, socuri, etc.	MG 20. Cl. de precizie 0,05. Pt. *anumite* măs. de frecv. mari (ex.; supravegherea funcționării stanțelor preselor etc.)	MD. Cl. de precizie 0,1. Măs. mom. de torsiune la arborele conduc. sau condus. Cu N3556A + Mz 3558 măsoară puterea și rand.	N. Cl. de precizie 0,1. Măs. turația arborilor. Cu MD3555 + + MZ3558 măs. puterea și randamentul	(vezi grupa MD și N)
KWS 82.A6.Z Ap. universal" utilizabil aproape în toate felurile de măsurări KWS 382.A7	KWS 80.A6.Z	KWS 20.A8.Z KWS 20.A9.Z *KWS 20.A6.Z* KWS 620.A7	MG 20.A8.Z *MG 20.A9.Z* MG 20.A6.Z	MD. A9.Z MD. A6.Z *MD. G1.Z*	N.A 9.Z N.A 6.Z *N.G 1.Z*	MD.N.MZA7
KWS82.D5.Z KWS382.D8	*KWS80.D5.Z*	–	–	MD.D5.Z	N.D.5.Z	*MD.N.MZD*

— pentru toate punctele, indicațiile în starea inițială pot fi aduse la zero;

— se poate citi direct valoarea mărimii măsurate (de ex. a deformației), în fiecare punct, în timpul măsurării;

— se poate opri încercarea în cazul în care în unele puncte mărimea măsurată atinge valori critice;

— se poate alege un domeniu adecvat de citire (domeniul de sensibilitate);

— se poate efectua rapid o reechilibrare în cazul unor dereglări sau a unor ușoare derive de zero.

Scanned with OKEN Scanner

c) echilibrarea *programată* la o valoare aproximativ egală cu zero (*efectuată în trepte*) se face cu ajutorul unui singur comutator central (9 trepte binare) pentru fiecare punct de măsură. Combinaţia treptelor poate fi programată în care scop se introduc manual sau automat în memorie

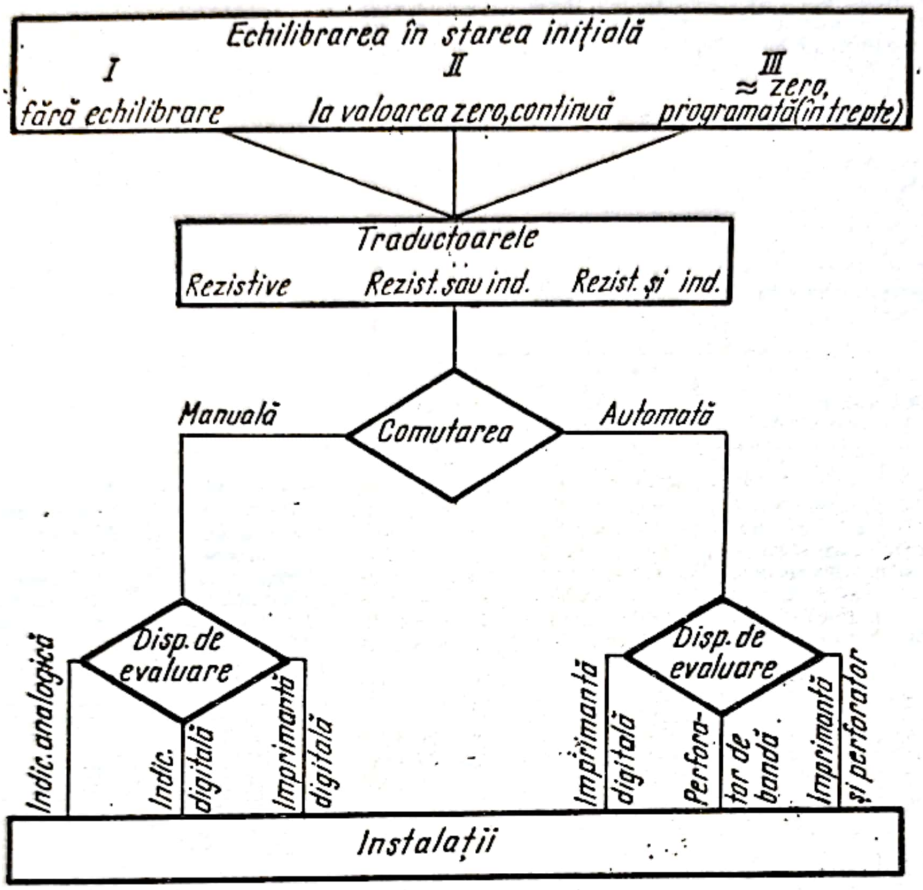


Fig. 3.75.

dispoziţiile de echilibrare, la începutul măsurării; memoria va acţiona elementele de echilibrare. La dispozitivele mai noi nu mai este necesară echilibrarea de fază. Faţă de echilibrarea continuă acest mod de echilibrare prezintă următoarele avantaje:

— reproductibilitatea indicaţiilor obţinute în starea iniţială a piesei de încercat;

— posibilitatea echilibrării automate prin stocarea valorilor într-un dispozitiv electronic de mici dimensiuni capabil să memoreze 1000 de valori;

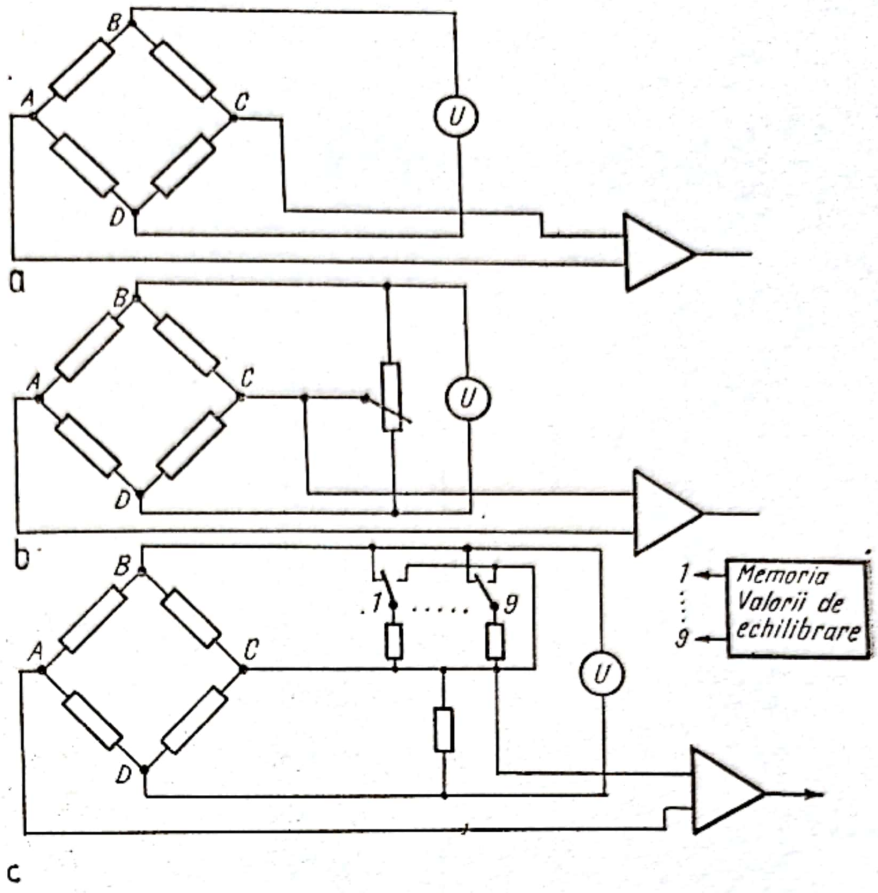
— posibilitatea echilibrării traductoarelor rezistive şi inductive conectate la aceeaşi instalaţie;

— preţ de cost al instalaţiei mai mic dacă numărul de traductoare este mare. Practic, s-a constatat că instalaţia de echilibrare automată devine rentabilă dacă numărul minim de traductoare comutate este de aprox. 80.

Diferite moduri de realizare a echilibrării sînt arătate schematic în figura 3.76 şi anume: a) fără echilibrare; b) cu echilibrare continuă; c) cu echilibrare programată iar dispozitivele reale sînt prezentate în figurile 3.77, 3.78 şi 3.79.

Scanned with OKEN Scanner

Fig. 3.76.



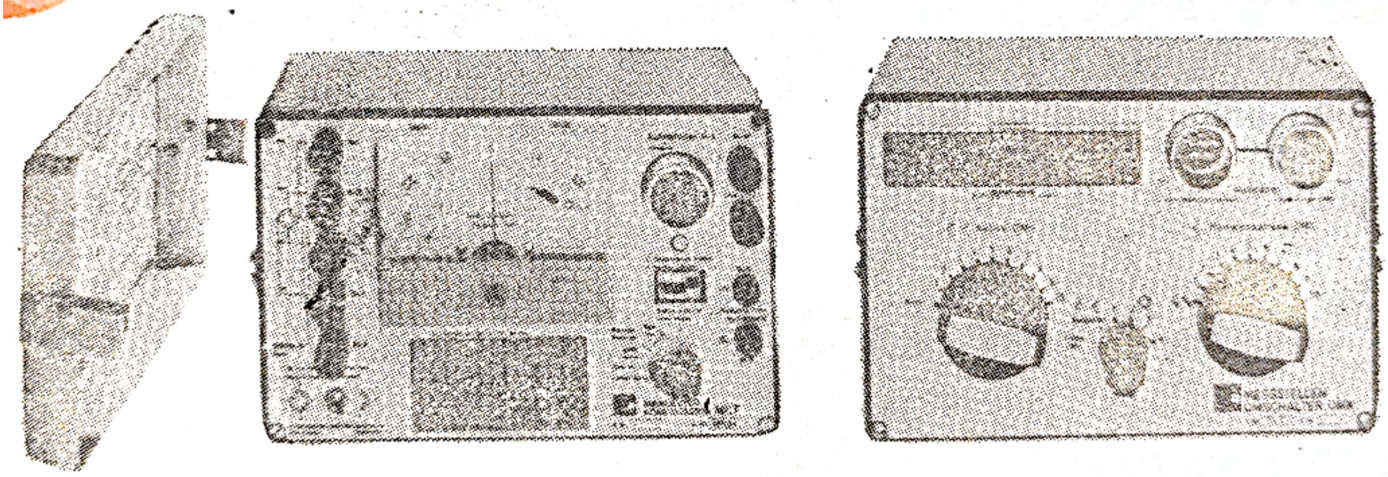


Fig. 3.77.

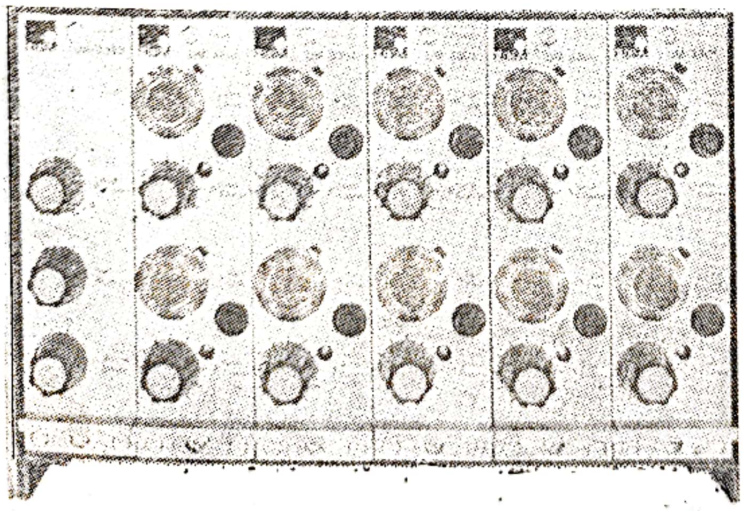
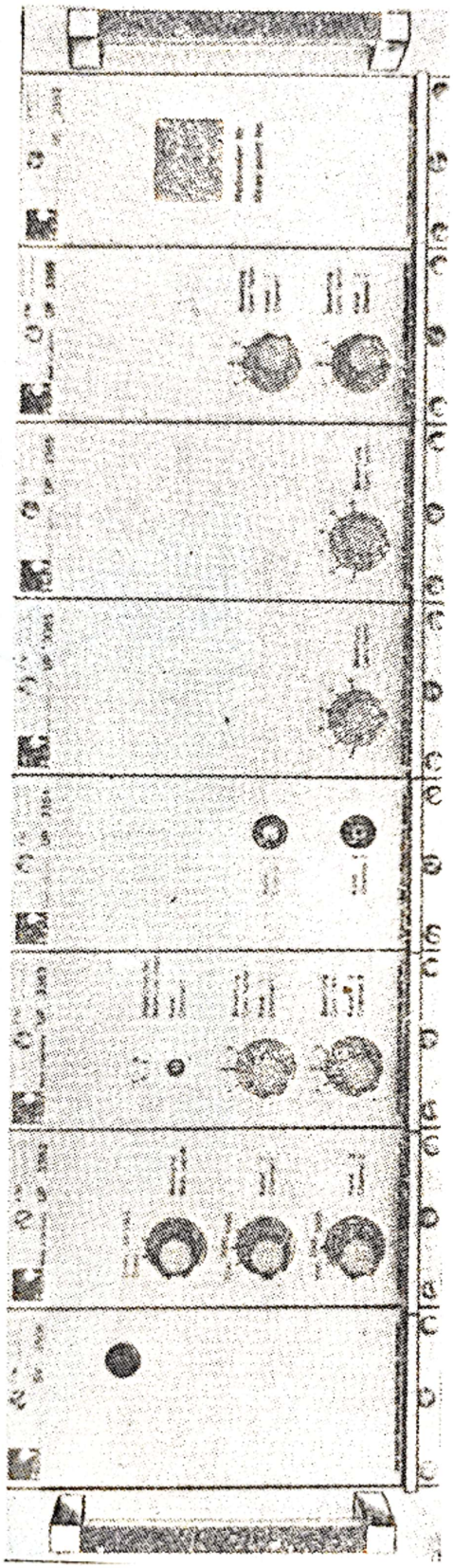


Fig. 3.78.



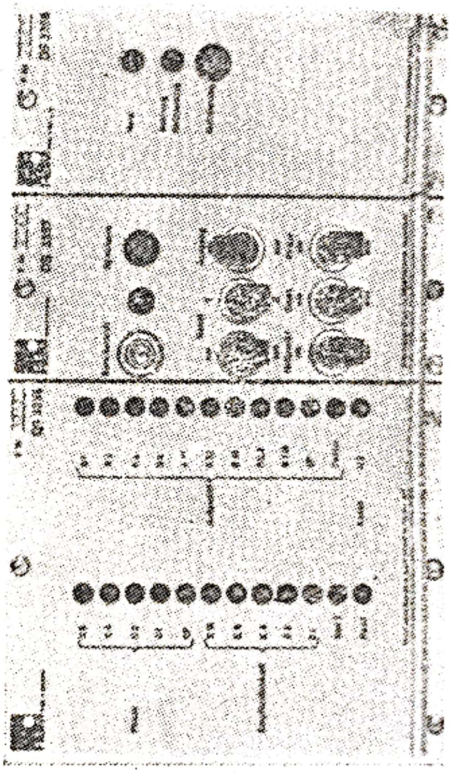


Fig. 3.79.

Alegerea tipului de amplificator tensometric sau/și a dispozitivelor de comutare depinde de *tipul traductoarelor* care urmează a fi conectate (rezistive sau/și inductive) și de schema de legare a acestora în punte (sfert, jumătate, sau punte completă); pentru aceasta este util să se consulte tabelele 3.9 și 3.10.

În ceea ce privește *modul de comutare* recomandat, acesta reiese din figura 3.75. Trebuie adăugat că în instalațiile de măsură în mai multe

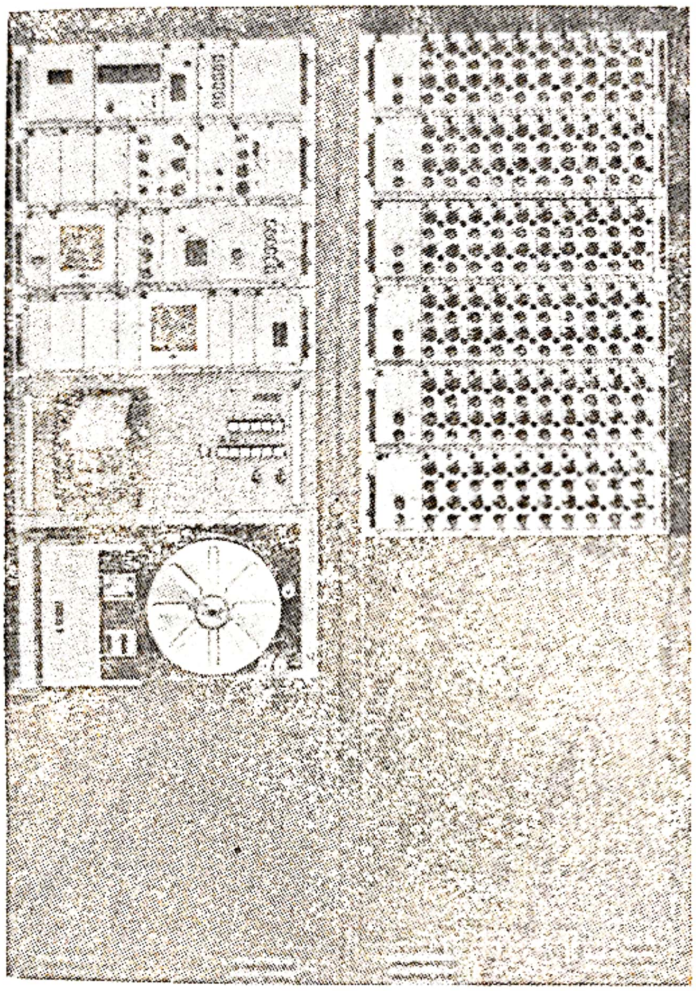


Fig. 3.80.

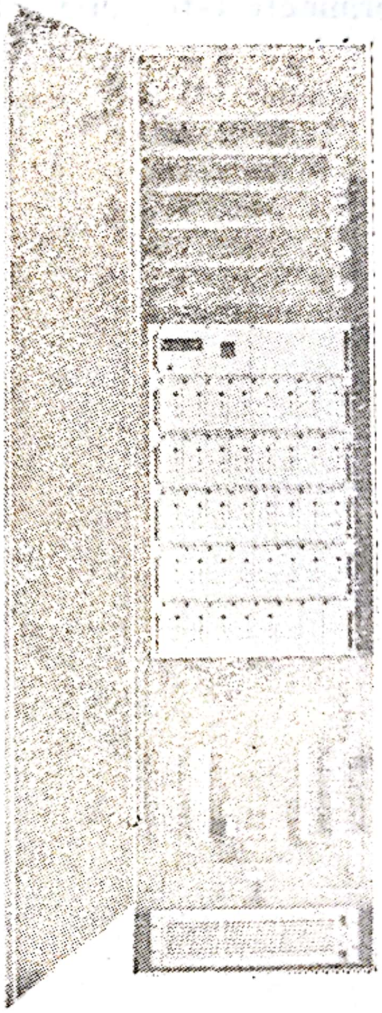


Fig. 3.81.

puncte se va prefera comutarea automată; este de dorit să fie posibilă și comutarea manuală în cazul în care echilibrarea „de zero" se face continuu. În acest caz se recomandă ca echilibrarea în starea inițială să se facă prin comutare manuală iar la înregistrarea valorilor în stare solicitată a piesei, comutarea să se facă automat.

Mai trebuie să se menționeze faptul că există dispozitive de comutare succesivă a punctelor de măsurat și dispozitive de comutare pentru măsurarea *simultană* în mai multe puncte.

O instalație de măsură cu comutare succesivă a 120 puncte de măsură este prezentată în figura 3.80 iar una pentru măsurări simultane în 36 de puncte este prezentată în figura 3.81.

Relativ la *modurile de evaluare a mărimilor măsurate* arătate schematic în figura 3.75, trebuie adăugat că înregistrarea pe bandă perforată se va folosi numai atunci cînd rezultatele măsurărilor trebuie stocate și prelucrate cu un calculator electronic. În toate celelalte cazuri se va evita acest tip de înregistrare deoarece operatorul nu-și va putea da seama, în momentul măsurării, de valoarea mărimii măsurate ci abia după decodificare. Din acest motiv înregistrarea digitală a rezultatelor cu ajutorul unei imprimante este preferabilă. Instalațiile moderne permit înregistrarea

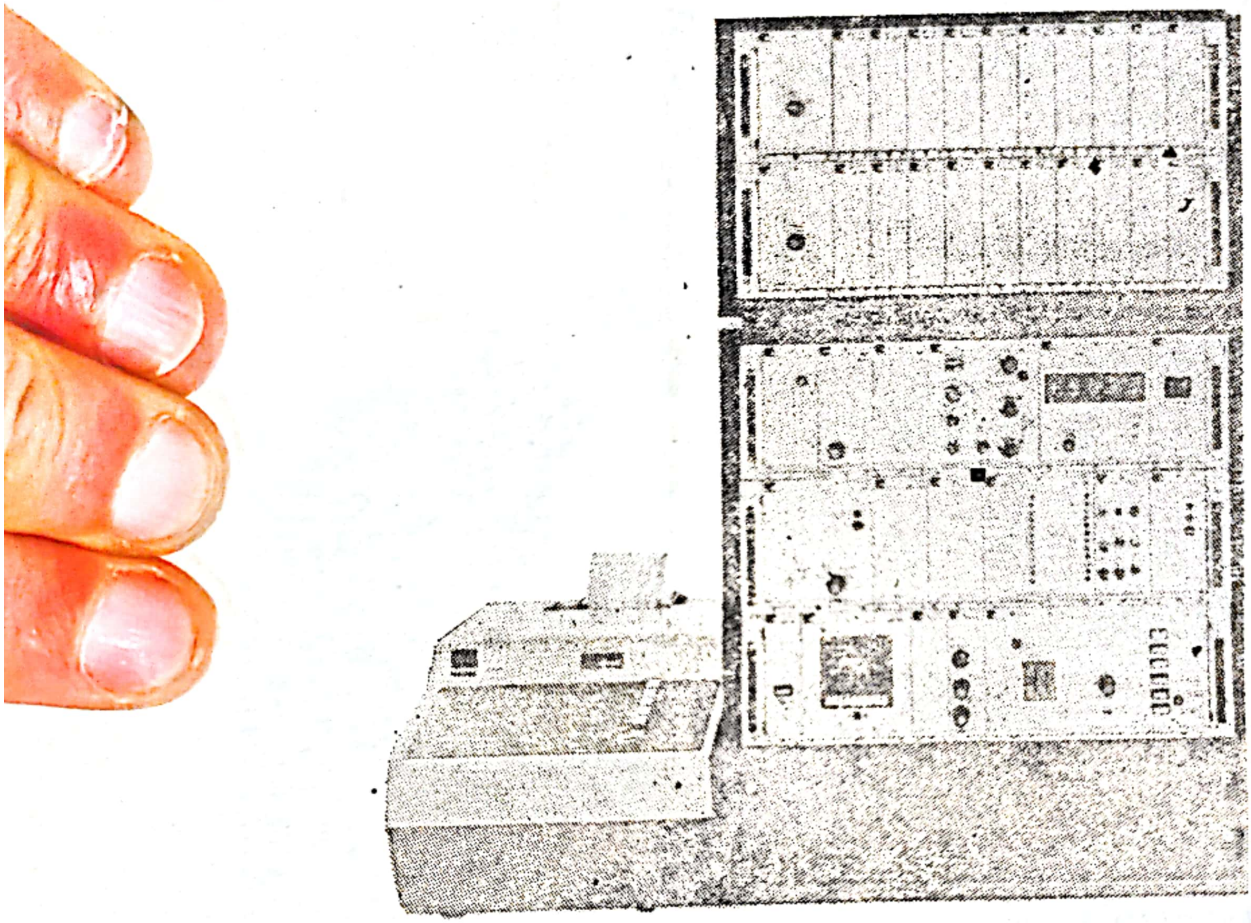


Fig. 3.82.

valorilor măsurate simultan atît codificată, pe bandă perforată, cît și digitală, cu ajutorul imprimantei. O astfel de instalație este prezentată în figura 3.82.

În ceea ce privește perforarea benzii, această operație depinde de codul folosit; mai folosite sînt:

— codul ISO — european (asemănător cu codul american ASCII)

— codul CCITT Nr. 2, folosit la Telex (internațional) care are avantajul că poate fi descifrat la oricare teleimprimator.

În încheiere în figura 3.83 este prezentat schematic un mod practic de asamblare a mai multor module HBM din sistemul 3000 într-un lanț de măsură pentru standuri, în vederea măsurării mai multor mărimi mecanice.

Scanned with OKEN Scanner

Lanţuri de măsură pentru supraveghere şi control. În afara celor expuse la începutul § 3.6.4 mai trebuie menţionat că aceste lanţuri au apărut relativ recent, odată cu noile realizări în domeniul electronicii. Apariţia

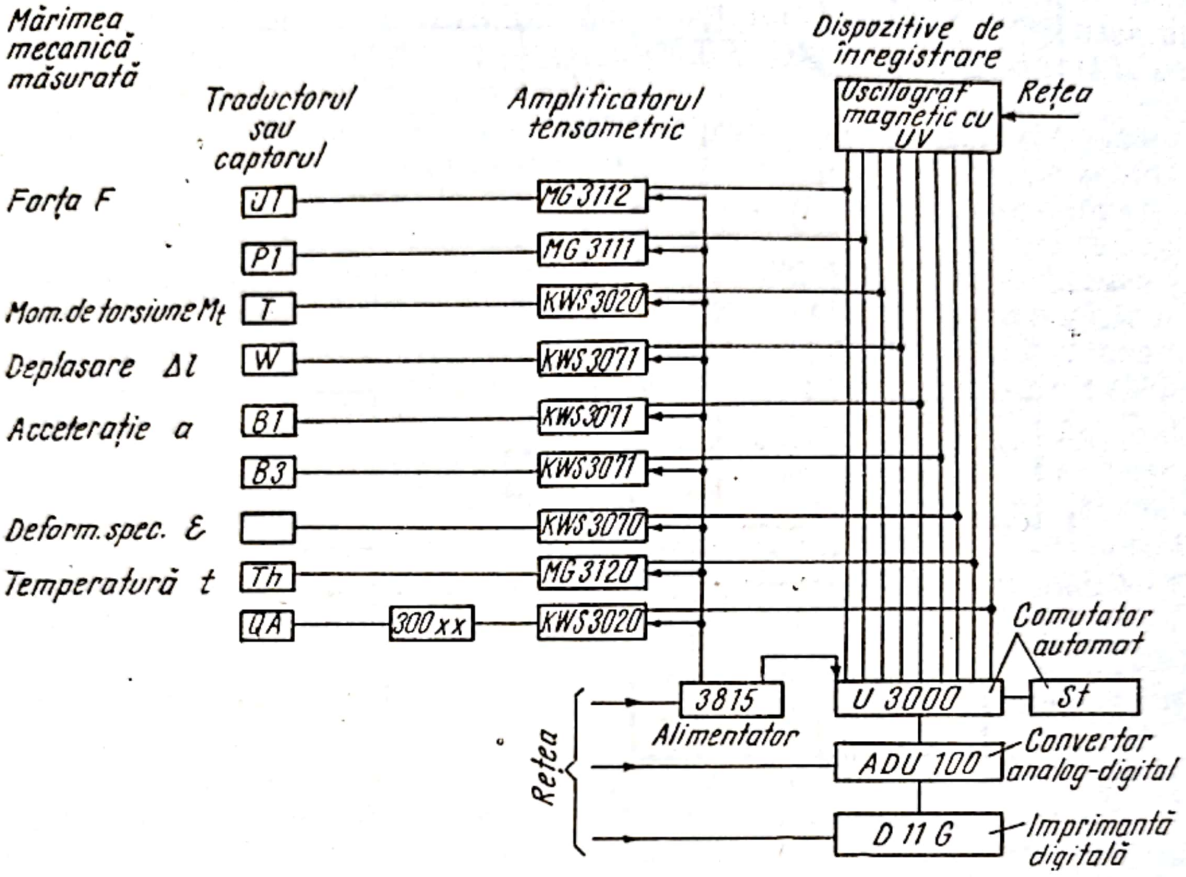


Fig. 3.83.

circuitelor integrate a permis să se reducă foarte mult dimensiunile unui amplificator.

Caracteristica acestor lanţuri de măsură constă în aceea că *amplificatorul tensometric se găseşte în captorul* mărimii de măsurat sub formă de circuit integrat.

Aceste lanţuri de măsură se folosesc în următoarele situaţii :

a) supravegherea şi controlul unor instalaţii la care variaţia mărimilor mecanice poate atinge valori critice ;

b) supravegherea şi controlul unor dispozitive şi instalaţii care funcţionează într-un mediu care pune în pericol viaţa operatorilor (de exemplu într-un mediu toxic, radioactiv etc.) ;

c) supravegherea şi controlul automat al unor instalaţii care ar putea pune în pericol viaţa omului. Caracteristica acestor lanţuri de măsură (spre deosebire de cele menţionate la aliniatele *a* şi *b*) constă în aceea că ele acţionează direct dispozitivele controlate, fără intervenţia omului.

Lanţurile de măsură menţionate la *a* şi *b* sînt prezentate schematic în figura 3.84, a, iar cele menţionate la *c* în figura 3.84, b.

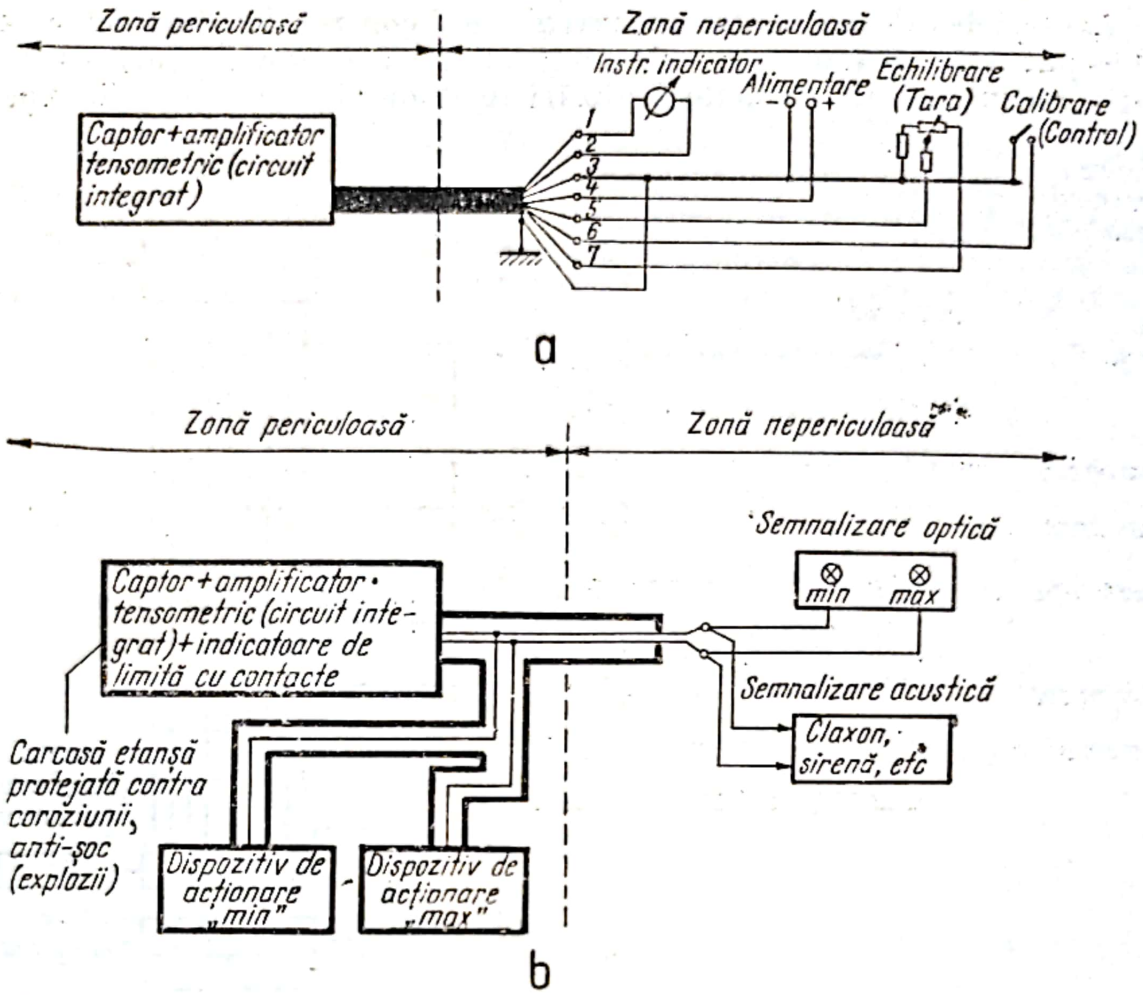


Fig. 3.84.

3.7. TEHNICA PREGĂTIRII ȘI EFECTUĂRII MĂSURĂRILOR

3.7.1. CONSIDERAȚII PRIVIND ORGANIZAREA ÎNCERCĂRILOR TENSOMETRICE

Pentru realizarea unei încercări tensometrice, trebuie să fie îndeplinite o serie de condiții. În afară de aparatura și materialele adecvate și de un personal care să le folosească cu competență, trebuie ca înainte de începerea experimentării să fie bine precizat obiectul lucrării, să se știe ce anume se urmărește și ce se poate obține cu mijloacele experimentale existente.

Odată fixat scopul lucrării experimentale, este necesar să se știe ce trebuie făcut pentru a-l atinge și ce amploare trebuie să fie dată lucrărilor.

În principiu, programul încercărilor nu trebuie să fie încărcat cu lucrări care nu sînt legate direct de obiectivul urmărit. Este totuși important de a nu restrînge prea mult acest program și de a folosi, oricare ar fi obiectivul urmărit, un număr de traductoare proporțional cu complexi-

Scanned with OKEN Scanner

tatea lucrării, ţinînd seama că la încercare unele rezultate pot să apară ca surprinzătoare ; de aceea este indicat ca, pentru verificare, să fie aplicate un număr de traductoare în puncte sau secţiuni simetrice celor considerate iniţial ca absolut necesare.

De aceea, orice încercare tensometrică trebuie executată în baza unui proiect de încercare elaborat de un specialist în astfel de măsurări în colaborare cu beneficiarul încercării.

Proiectul de încercare trebuie să cuprindă necondiţionat elementele şi secţiunile acestora ce urmează a fi încercate precum şi o prezentare a motivelor care au condus la alegerea lor. Acest lucru este foarte important deoarece se întîmplă adesea să nu se poată aplica traductoarele exact pe elementul sau în secţiunea indicată, fie din cauza unor elemente constructive (nituri, cusături de sudură) sau a unor defecte locale (striviri, îndoiri, corodări, porozităţi) fie din cauză că nu toate punctele din secţiune sînt accesibile şi atunci conducătorul încercării trebuie să aleagă un alt element sau o altă secţiune, care să furnizeze datele urmărite.

Specialistul în tensometrie care este în măsură să aprecieze posibilităţile pe care le are metoda de cercetare precum şi volumul de lucru, are un rol primordial la întocmirea unui proiect de încercare corespunzător.

Stabilirea definitivă a poziţiei secţiunilor şi a traductoarelor se face numai la faţa locului, astfel ca :

— secţiunea aleasă să nu cadă într-o zonă cu defecte ca : deformaţii locale, nituri slabe sau lipsă, urme de îndreptare la rece sau la cald, fisuri etc. ;

— secţiunea să fie liberă adică să fie accesibilă pe toate părţile în vederea aplicării comode a traductoarelor şi să nu aibă în apropiere piese care în mod obişnuit nu se iau în considerare în calculele de rezistenţă dar care modifică suprafaţa netă cum ar fi fururile, consolele de susţinere ale unor instalaţii, conducte, dispozitive de susţinere a schelelor etc ;

— suprafeţele pe care se vor lipi traductoarele să nu prezinte urme de lovituri, striviri, urme adînci de coroziuni a căror îndepărtare cu polizorul ar conduce la micşorarea sensibilă a secţiunii piesei.

La elementele de beton şi de beton armat nu se vor alege secţiunile din zonele cu vicii de turnare, cu incluziuni de lemn sau metal (purici), cu pete de ulei, motorină etc., cu urme de lovituri, striviri şi îngheţ. Se vor evita zonele cu urme de segregare, cu armătura vizibilă, cu pori mari sau goluri precum şi zonele în care s-a întrerupt betonarea. Se va evita de asemenea aplicarea traductoarelor în zonele fisurate sau fisurabile (afară de cazul cînd se urmăreşte apariţia acestora). Este recomandabil ca la elementele de beton armat supuse la încovoiere, în zona întinsă să se aplice traductoare suplimentare mai apropiate de axa neutră pentru ca după fisurarea fibrelor întinse extreme să mai rămînă traductoare în funcţiune care să furnizeze valori pentru trasarea diagramei de distribuţie a tensiunilor.

În cazul unor elemente la care distribuţia tensiunilor este necunoscută — de exemplu zona influenţată de concentratorii de tensiuni — trebuie neapărat ca măsurările tensoelectrice să fie precedate de cercetări de

Scanned with OKEN Scanner

laborator care să pună în evidenţă — sub aspect calitativ — regiunile şi direcţiile de solicitare care interesează.

Pentru aceasta se poate folosi fie fotoelasticitatea, cercetîndu-se un model al elementului ce face obiectul cercetării, fie metoda lacurilor casante. Ambele metode sînt laborioase şi necesită personal specializat. Totuşi metoda lacurilor casante prezintă unele avantaje prin faptul că se poate aplica chiar pe piesa care interesează şi pe care se vor face apoi măsurările tensoelectrice; în plus metoda nu implică existenţa unei aparaturi costisitoare (vezi cap. 7).

Desimea şi orientarea fisurilor ce apar în lacul casant dau indicaţii utile asupra mărimii şi orientării tensiunilor şi deci asupra locului şi direcţiei în care trebuie plasate traductoarele rezistive.

De o deosebită importanţă pentru reuşita unei încercări electrotensometrice este alegerea celor mai potrivite materiale din numeroasele materiale care se găsesc în cataloagele firmelor furnizoare.

3.7.2. ALEGEREA TRADUCTOAREOLOR, ADEZIVILOR ŞI A MATERIALELOR DE PROTECŢIE

Alegerea tipului de traductoare. Pentru măsurarea deplasărilor sau a acceleraţiilor se folosesc, de regulă, traductoare inductive sau capacitive în funcţie de valoarea aproximativă a mărimii de măsurat şi de condiţiile de încercare; pentru alegerea lor se pot folosi indicaţiile din tabelul 3.4; indicaţii mai amănunţite privind performanţele, modul de lucru şi domeniul de aplicare al acestor tipuri de traductoare sînt date în cataloagele firmelor furnizoare.

Pentru măsurarea alungirilor se folosesc traductoarele rezistive în special cele cu reţea metalică. Există, aşa cum s-a arătat şi în tabelul 3.2, o foarte mare varietate de tipuri; de asemenea există şi numeroşi furnizori de astfel de traductoare; furnizorii din ţară şi principalii furnizori din străinătate sînt menţionaţi în tabelul 3.13.

Traductoarele de uz special trebuie alese din cataloagele firmelor furnizoare conform condiţiilor concrete în care se face încercarea. Astfel pentru măsurări la temperaturi înalte hotărîtoare pentru alegerea tipului de traductor sînt: limitele maxime de temperatură la care acesta trebuie să funcţioneze, regimul de solicitare (static sau dinamic) şi forma suprafeţei (plană sau curbă) pe care urmează a fi aplicat traductorul. Pentr suprafeţele plane este mai comod a folosi traductoare aplicate cu adeziv ceramic pe folii de oţel care apoi se pot suda uşor pe structura de încercat. Cu acelaşi traductor de temperaturi înalte se pot face măsurări în regim dinamic pînă la temperaturi cu 150 ... 250°C mai mari decît cele admise în regim de solicitare statică.

Traductoarele de uz general, care se execută într-o mare varietate de tipo-dimensiuni, se aleg în funcţie de starea şi regimul de solicitare, dimensiunile şi forma piesei, condiţiile de lucru, importanţa construcţiei, precizia impusă rezultatelor încercărilor. În afară de aceşti factori de natură

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.13

Furnizori de traductoare rezistive şi captoare

Nr. crt.	Furnizorul şi ţara	Traductoare rezistive de uz general	Traductoare cu semiconductoare	Traductoare de uz special		Captoare
				Temperaturi înalte	Alungiri mari	
1	Baldwin Lima Hamilton, S.U.A.	×	×	×	×	×
2	Budd Company, S.U.A.	×		×		×
3	Hottinger Baldwin Messtechnik, R.F.G.	×	×	×	×	×
4	ICPTT, Bucureşti, R.S.R.	×				
5	INCERC, Bucureşti, R.S.R.	×				
6	Kyowa, Japonia		×			
7	Magnaflux, S.U.A.	×			×	
8	Micro Measurements, S.U.A.	×		×	×	×
9	Peekel, Olanda				×	
10	Philips, Olanda	×	×			
11	Proud, R.S.C.	×				
12	Showo, Japonia	×				
13	Vibro Meter Corp., Elveţia	×	×	×		
14	Vishay Intertechnology, S.U.A.	×		×	×	×

tehnică, trebuie avut în vedere şi factorul economic, în sensul că încercarea trebuie efectuată, de regulă la un cost cît mai redus.

De aceea, la încercările la care nu se cere o foarte mare exactitate efectuate în laborator sau pe standuri aflate în spaţii închise sînt preferate traductoarele cu fir metalic şi suport de hîrtie, care sînt cele mai ieftine.

Se utilizează de regulă traductoare cu rezistenţă de 120 Ω.

Deşi s-au realizat traductoare cu bază foarte mică (în ultimul timp au apărut traductoare cu $l_0 = 0{,}2$ mm) nu se recomandă utilizarea acestora decît dacă piesa are dimensiuni mici sau prezintă zone de concentrare cu gradienţi mari de tensiune. La celelalte piese şi structuri metalice se recomandă utilizarea traductoarelor cu $l_0 = 6 \ldots 20$ mm ; de menţionat că la încercările materialului rulant feroviar, UIC (Uniunea Internaţională de Căi Ferate) recomandă utilizarea traductoarelor cu $l_0 = 10$ mm.

Pentru măsurările la care se cere o precizie mai ridicată se vor alege traductoarele din folie, adaptate materialului structurii (oţel, aluminiu, cupru) iar în cazul solicitărilor variabile se vor alege traductoarele cu capetele de legătură de construcţie specială, tipul de traductoare fiind ales în funcţie de numărul ciclurilor de solicitare şi amplitudinea alungirilor care trebuie măsurate.

În cazul stării plane de solicitare se vor aplica rozete cu două traductoare, care se vor orienta după direcţiile principale sau rozetele cu trei şi patru traductoare dacă direcţiile principale de solicitare nu sînt cunoscute. Pe elementele de dimensiuni mari este mai indicat ca în locul rozetelor să fie utilizate traductoare simple orientate pe direcţiile principale, reducîndu-se astfel costul lucrării experimentale.

Lungimea şi tipul traductorului este determinată şi de raza de curbură a suprafeţei pe care urmează a fi aplicat ; astfel traductoarele cu suport

Scanned with OKEN Scanner

fenolic pot fi aplicate pe suprafeţe cu $r_{min} = 5$ mm, iar cele cu suport epoxi pe suprafeţe cu $r_{min} = 2$ mm.

Pentru măsurarea alungirilor foarte mici ($\varepsilon < 10^{-8}$) trebuie folosite traductoare cu semiconductoare.

În cazul cînd piesa este supusă în timpul încercării unui regim termic neuniform şi cu o variaţie rapidă, în limitele temperaturilor uzuale, se recomandă utilizarea traductoarelor cu autocompensare a efectului variaţiei de temperatură.

Pentru elementele din materiale plastice se aleg traductoare care pot măsura alungiri mari (pînă la 10%).

Pe elementele de beton, ţinînd seama de neomogenitatea materialului, se aplică traductoare cu o bază $l_0 = 40 \ldots 200$ mm, în funcţie de dimensiunile acestor elemente şi de granulaţie. De exemplu pentru traversele de beton armat utilizate la căile ferate se pot utiliza traductoare cu $l_0 = 40 \ldots 50$ mm. De regulă baza traductorului trebuie să fie de cel puţin 5 ori mai mare decît mărimea granulaţiei betonului.

Alegerea adezivului. Pînă în prezent nu s-a reuşit să se realizeze un adeziv care să întrunească toate calităţile cerute în tensometrie şi care să aibă o bună comportare în toate situaţiile care pot interveni la efectuarea unei măsurări.

De aceea există o varietate destul de mare de tipuri de adezivi fiecare dintre aceştia avînd unele proprietăţi care-l fac adecvat unor anumite condiţii de măsurare. Principalele tipuri de adezivi utilizaţi la lipirea traductoarelor rezistive sînt prezentate în tabelul 3.14 [32]. Aceşti adezivi pot fi folosiţi şi la fixarea pe structura de încercat a celorlalte tipuri de traductoare dacă nu este posibilă fixarea acestora prin alte mijloace. Tabelul 3.14 cuprinde adezivii pentru aplicarea traductoarelor ce trebuie să funcţioneze o durată relativ scurtă, cum este cazul la măsurările efectuate în mod obişnuit pe structura şi piesele care se dau sau se află în exploatare. Pentru traductoarele care trebuie să funcţioneze un timp îndelungat, cum sînt traductoarele aplicate pe elementele de măsurare ale captoarelor, se utilizează diverse tipuri de adezivi speciali, cu o tehnologie mai complicată de lipire, prescrisă de firmele furnizoare.

Alegerea adezivului se face, după cum rezultă şi din tabelul 3.14, în funcţie de materialul structurii şi al suportului traductorului, de condiţiile atmosferice în care se efectuează pregătirea măsurărilor şi de posibilităţile de a aplica o anumită tehnologie de lipire în aceste condiţii, de temperatura la care se face încercarea, de durata pentru care trebuie asigurată o bună funcţionare a traductoarelor etc. Alegerea adezivului este determinată de asemenea de costul lui şi de posibilităţile de procurare şi conservare.

La noi în ţară cei mai folosiţi adezivi sînt : adezivul pe bază de nitroceluloză (celuloid), adezivii Eastman 910, Z70, X60 şi aralditul.

Adezivul pe bază de nitroceluloză, este livrat de diverse firme sub diferite denumiri — SR—4 (Baldwin), Cement (Proud — R.S.C.), Agol (R.D.G.) — dar poate fi preparat cu uşurinţă de utilizator după diverse reţete [19]. Este adecvat pentru lipirea traductoarelor cu suport de hîrtie pe metale şi pe o serie de materiale sintetice care nu sînt dizolvabile în

Scanned with OKEN Scanner

Adezivi pentru lipirea traductoarelor rezistive

Tabelul 3.14

Tipul adezivului	Organic, aplicabil prin:							Ceramic, aplicabil prin:			
	Evaporarea solventului la temperatura ambiantă	Înmuiere termoplastică	Reacție chimică					Evaporare la cald	Reacție chimică la cald	Pulverizare de material topit	Topire la temperatură înaltă
			La temperatura ambiantă			La cald					
Materialul de bază	Nitroceluloză	Șelac	Acrilic	Poliester	Epoxi	Epoxi	Fenolic]	Silicat	Fosfat	Oxid refractar	Sticlă
Tip reprezentativ	Baldwin SR–4	Dekhotinsky	Eastman 910 Hottinger Z70	Philips PR 9244 Hottinger X60	Araldit	Araldit	Bachelită PR 9246	Baldwin RX–1	Brimor Cement	Rokide A Rokide C	Hommel L–6AC
Timpul de aplicare (întărire) *)	2–24 ore	Timpul de răcire	5 min.	5...15 min.	12 ... 72 ore	2 ... 10 ore	1 ... 6 ore (la temp. camerii în 72 ore)	1 oră	1 oră	Imediat	30 min.
Temperatura pentru aplicare (întărire)	20 ... 65°C	Înmuiere la 130°C	Ambiantă	Ambiantă	20–65° C	100...250°C	100...200°C	110°C	300...600°C	—	1000°C
Presiunea la aplicare (daN/cm²)	0,1 ...0,5	0,1 ... 1	0,1 ... 1	0,5 ... 1	0,5 ... 1	0, 3 ... 3	1 ...5	—	—	—	—
Alungirea la care se produce ruperea la capete	10%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	5‰	5‰	2%	5‰
Tipurile de traductoare la care se poate folosi	Cu suport de hîrtie	Toate tipurile care suportă temp. de înmuiere	Toate (cu excepția celor pe hîrtie)	Toate	Toate	Toate care suportă temp. de aplicare	Cu suport fenolic	Folie fără suport și cu izolație ceramică	Folie fără suport și cu izolație ceramică	Folie fără suport și cu izolație ceramică	Folie fără suport și cu izolație ceramică
Izolația electrică	F. bună	F. bună	F. bună	F. bună	F. bună	F. bună	Foarte bună peste 150°C	Descrește cu temperatura	Descrește cu temperatura	F. bună dar descrește cu temperat.	F. bună
Rezistență la umezeală	Satisf.	Bună	Satisf.	Satisf.	Bună	Bună	Bună	Slabă, se dizolvă în apă	Satisf.	Bună	F. bună
OBSERVAȚII	Solubil în acetonă; nu este indicat pt. materiale care se dizolvă în acetonă	Adezivul se înmoaie în contact cu proba încălzită	Are calități slabe de conservare. Indicat pt. măsurări de scurtă durată.	Are calități slabe de conservare. Trebuie depoz. la temperat. joase	Adezivi cu două componente. Unii întăritori sînt toxici		Bune calități de conservare	Reacționează nefavorabil cu unele metale și materiale plastice		Poros	Indicat pt. toate metalele care suportă temp. de aplicare

*) Prin încălzire se accelerează întărirea.

Scanned with OKEN Scanner

acetonă; are o durată mare de întărire la temperatura ambiantă (aprox. 24 ore la 15 — 25°C); această durată, poate fi redusă prin încălzire, dar există pericolul formării unor bule în stratul de adeziv prin grăbirea evaporării solventului. Este foarte higroscopic din care cauză este folosit mai mult în cazurile cînd lipirea se poate face în încăperi închise și uscate, la lucrările exterioare fiind aproape imposibil de a-l feri de acțiunea umidității în timpul necesar evaporării solventului. În plus sînt necesare dispozitive de presare pe toată durata de întărire a adezivului. De aceea folosirea lui este limitată practic la lucrări efectuate în laborator.

Adezivul „Eastman 910" fabricat de firma „Budd" din S.U.A., este livrat de diverse firme din Franța și R.F.G. sub forma unor truse care conțin un flacon de adeziv și o sticluță de accelerator și, uneori, un flacon de neutralizant și condiționer pentru metal. Poate fi folosit pentru lipirea tuturor tipurilor de traductoare pe piese sau structuri din orice material, cu excepția celor poroase, putîndu-se efectua măsurări statice între —200°C și 60°C iar în regim dinamic pînă la 120°C.

În lipsa acceleratorului adezivul se întărește după 10—15 minute iar în contact cu acceleratorul și prin presare, se întărește aproape instantaneu, ceea ce implică o anumită tehnologie pentru orientarea pe o anumită direcție a traductorului înainte de aplicare, știind că după aceea poziția traductorului nu mai poate fi corectată.

După lipire, asigură buna funcționare a traductorului un timp limitat. De asemenea calitățile adezivului sînt garantate pentru un termen destul de scurt (cîteva luni). Dacă este conservat la temperaturi scăzute (în frigider) și nu este supus la șocuri și trepidații, poate fi folosit și după expirarea termenului de garanție, adezivul păstrîndu-și calitățile de lipire, atîta timp cît i se menține fluiditatea și claritatea; în momentul cînd începe să devină vîscos și tulbure trebuie scos din uz.

Adezivul este foarte higroscopic, umiditatea producînd o modificare ireversibilă a calităților sale, în urma căreia izolarea electrică și lipirea devin necorespunzătoare. De aceea, imediat după lipire, trebuie efectuată cu multă îngrijire protejarea contra umidității. La o bună protecție asigură o rezistență de izolație de peste 10000 MΩ.

Adezivul Z 70, furnizat de firma Hottinger-Baldwin, are un singur component și are calități similare cu ale adezivului Eastman 910; poate fi utilizat cu orice tip de traductor pentru măsurări de la —240°C pînă la 80°C în regim static, respectiv 90°C în regim dinamic și asigură lipirea pe majoritatea materialelor folosite la realizarea pieselor și structurilor de rezistență. În condițiile unei temperaturi de 15...20°C și umidități relative de 40 ... 70% realizează lipirea traductorului în timp de 1 ... 2 minute în urma unei simple apăsări cu degetul. La temperaturi mai joase și la o umiditate sub 20% nu realizează lipirea. Are un termen limitat de păstrare a calităților la temperatura ambiantă, dar practic nelimitat dacă este conservat în congelator (la —15°C).

Adezivul X 60, livrat tot de firma Hottinger-Baldwin, are doi componenți: unul lichid și celălalt sub forma unui praf alb. Este indicat pentru lipirea traductoarelor cu suport acrilic precum și a celor cu suport fenolic cu suprafață mată. Durata procesului de lipire este mai mare decît la

ceilalți adezivi, fiind necesar un timp pentru pregătirea amestecului celor doi componenți și un timp de priză (întărire) mai mare. În plus procedeul implică prepararea unei cantități reduse de amestec și anume cea necesară pentru lipirea a 1—2 traductoare. Întărirea mai lentă a adezivului permite în schimb o mai bună lipire a traductoarelor în regiuni greu accesibile sau în regiunile cu schimbări de secțiuni, cunoscînd că la scurt timp după aplicarea traductoarelor direcția lor poate fi, la nevoie, ușor corectată. După apăsarea cu degetul timp de cca. 1 minut, adezivul se întărește la temperatura ambiantă într-un interval de timp de 10 ... 20 minute de la aplicare.

La temperaturi mai scăzute, întărirea are loc într-un timp mai îndelungat; în aceste situații se recomandă încălzirea locului de aplicare a traductorului cu raze infraroșii. După lipire permite efectuarea de măsurări în regim static între —200°C și +80°C iar dinamic pînă la 100°C.

Amestecul fiind mai vîscos, avînd consistența unei paste, poate fi aplicat și pe materiale poroase, cum este betonul, realizînd o lipire foarte bună a traductoarelor pe astfel de materiale.

Componentul lichid are un termen de garanție de cîteva luni la temperatura ambiantă; prin conservarea la temperaturi scăzute termenul de utilizare poate fi mult prelungit.

Observații: Adezivii rapizi, descriși mai sus, au un termen de garanție relativ redus care poate fi prelungit însă prin conservare la temperatură și umiditate scăzută. Priza (întărirea) se realizează întotdeauna în mediu bazic și de aceea alcalinitatea vaporilor dintr-o atmosferă cu o umiditate relativă de peste 40% favorizează priza. În mediu puternic alcalin, priza are loc aproape instantaneu pe cînd în mediu acid priza se prelungește un timp îndelungat sau nu are loc. De aceea trusele de adeziv livrate de unele firme au, pe lîngă adeziv și accelerator, un component de neutralizare a substanțelor acide; din același motiv flaconul cu adeziv trebuie bine închis, mai ales în cazul unei atmosfere foarte umede.

Timpul de priză este micșorat prin ridicarea temperaturii; la adezivul Z 70 este suficientă, în acest scop, căldura transmisă de la corpul omenesc prin apăsarea cu degetul. Flacoanele cu adezivi trebuie ferite de șocuri și trepidații care reduc termenul în care adezivul își păstrează proprietățile.

Toți adezivii sînt higroscopici și după lipire trebuie aplicată o protecție eficientă contra umidității.

Araldítul este folosit, de regulă, pentru lipirea traductoarelor pe elemente de beton sau alte materiale poroase dar poate fi folosit și pentru lipirea traductoarelor, de orice tip, pe piese metalice. Este un adeziv epoxidic cu doi componenți; dintre sorturile de araldit fabricate de CIBA — Elveția, în tensometrie se utilizează „araldit 121 B" cu întăritorul HY 951. Araldítul 121 B este o rășină epoxidică sub forma unei paste albe, iar întăritorul este cu lichid incolor cu miros caracteristic. Cu timpul întăritorul devine inutilizabil, alterîndu-se, ceea ce se constată prin mirosul de amoniac pe care-l capătă.

Termenul de conservare, la temperatura ambiantă, este de cca. 12 luni.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru lipire se pregătește un amestec de răşină — pastă cu 4,5% întăritor. Odată pregătit, amestecul poate fi folosit pentru lipirea mai multor traductoare într-un interval de timp de 10—15 minute, după care devine prea vîscos şi nu mai poate fi aplicat pe suportul traductorului.

Întărirea completă a adezivului se realizează la temperatura ambiantă după cca. 24 ore de la aplicare, dar poate fi accelerată prin încălzire. Pentru o bună aderenţă pe beton este necesată uscarea acestuia.

După întărire adezivul devine nehigroscopic şi de aceea este utilizat şi ca material de protecţie.

Poate fi folosit pentru măsurări între —40°C şi +150°C.

Alegerea materialului de protecţie. Ţinînd seama de faptul că majoritatea adezivilor sînt higroscopici este necesar ca, după lipire, traductoarele să fie protejate contra acţiunii umezelii care poate altera pelicula de adeziv sau poate conduce la scăderea sub limita admisă a rezistenţei de izolaţie electrică a traductoarelor faţă de piesă (v. § 3.4.3.). Rezistenţa de izolaţie avînd o mare importanţă în buna funcţionare a traductoarelor, trebuie asigurată o protecţie cît mai sigură contra umezelii.

Felul protecţiei depinde de condiţiile de umiditate în care vor funcţiona traductoarele precum şi de durata lor de folosire.

În laborator, în hale închise sau chiar în exterior pentru încercări ce se efectuează vara în aceiaş zi în care se aplică traductoarele şi, în general, atunci cînd umiditatea este mică şi nu există pericol de condensare, se poate folosi o protecţie uşoară, prin aplicarea unei benzi aderente de polietilenă şi prin care se acoperă traductorul şi stratul de adeziv ieşit la presare de sub suportul acestuia.

În cazul în care traductoarele trebuie să lucreze în condiţii grele, fiind expuse acţiunii directe a ploii, zăpezii, a aburului sau chiar sînt cufundate în apă, protejarea se face în mai multe straturi. În acest scop firmele străine recomandă diferite materiale de protecţie.

Dintre acestea, în ţară au fost folosite cu bune rezultate materialele oferite de firmele Huggenberger (Elveţia) şi Hottinger — Baldwin (RFG). Materialul de bază este un chit de cauciuc care se prezintă ca o masă de consistenţa plastilinei. Firma Huggenberger livrează acest produs sub indicativul PK iar Hottinger — Baldwin sub cel de AK 22.

Traductorul este acoperit mai întîi cu o bandă adezivă de polietilenă peste care se aplică un strat de chit de cauciuc. Chitul AK 22, care are în componenţa sa şi ulei siliconic, se aplică direct, iar chitul PK se aplică după ce în prealabil s-a dat peste traductor un strat de adeziv lichid pe bază de cauciuc (livrat de firma Huggenberger sub denumirea de „Haftgrund"), care asigură o mai bună aderenţă a protecţiei. Aceste materiale asigură o bună protecţie contra umezelii chiar în situaţiile în care traductorul se află sub apă, la o presiune de 200 daN/cm².

Cu bune rezultate a fost utilizat pentru protecţie şi un chit de cauciuc, similar celor de mai sus, produs de combinatul de cauciuc Jilava.

Dacă traductoarele sînt expuse pericolului de lovire se execută şi o protecţie mecanică fie prin acoperire cu o cutie metalică sau din material sintetic, fie prin aplicarea peste chitul de protecţie a unei folii dintr-un material plastic mai rigid.

Scanned with OKEN Scanner

Pregătirea suprafeţelor în vederea aplicării traductoarelor. Pentru o bună aderenţă a adezivului, suprafaţa piesei trebuie să fie foarte curată, fără nici-o urmă de murdărie, ulei, praf, etc. şi neutră din punct de vedere chimic.

De aceea, înainte de aplicarea traductoarelor sînt necesare o serie de operaţii de curăţire mecanică şi chimică, care trebuie efectuate în mod obligatoriu.

a) *Pregătirea mecanică* are ca scop îndepărtarea stratului de vopsea, oxizi, scorii etc. de pe suprafaţa metalului în locurile unde se vor aplica traductoare, iar la elementele de beton pentru a se obţine o suprafaţă plană fără rugozităţi.

O suprafaţă de o foarte bună calitate se obţine prin sablare. Pentru lucrările ce se execută în mod obişnuit se execută polizarea cu ajutorul polizoarelor electrice sau pneumatice. La elementele metalice se folosesc pietre de polizor cu granulaţie fină şi antrenate cu viteză mare. Cu cît viteza este mai mică iese mai aspră şi mai neuniformă. Sînt preferabile polizoarele pneumatice uşoare şi pietre de diametru mic, pentru că se pot manevra cu uşurinţă în toate poziţiile. Înainte de polizare se îndepărtează stratul de vopsea prin raşchetare sau prin lovituri uşoare de ciocan. Suprafaţa obţinută după polizare trebuie să fie plană, lucioasă, fără denivelări locale şi fără urme de oxizi sau scorii.

În cazul în care după îndepărtarea vopselei se constată că suprafaţa prezintă urme adînci de coroziune, pori, striviri etc. se vor alege alte poziţii pentru traductoare.

În final polizarea trebuie efectuată cu o piatră cu granulaţie foarte fină pentru a obţine o suprafaţă cît mai netedă. După aceea, oricare ar fi gradul de finisare al suprafeţei, aceasta se aspreşte prin frecare cu pînză emeri pe direcţii perpendiculare.

În cazul suprafeţelor de beton, după polizare cu piatra de polizor — cu granulaţie mai mare decît cea folosită la metal — suprafaţa trebuie curăţată perfect de orice urmă de praf. Această operaţie se face cu ajutorul unei perii de păr nu prea aspră şi apoi cu o perie cu păr lung. În cazul suprafeţelor de beton cu iregularităţi foarte mari, rectificarea acestora nu trebuie făcută cu dalta şi ciocanul, ci numai prin polizare şi eventual prin nivelare cu un strat de răşină epoxidică, aceeaşi care este folosită şi la lipirea traductoarelor.

După terminarea pregătirii mecanice a suprafeţelor se marchează direcţia şi poziţia traductoarelor prin zgîriere cu un vîrf ascuţit de oţel dur. Urmele trebuie să fie subţiri şi să marcheze axele longitudinale şi transversale ale traductoarelor. La trasare se utilizează metrul, şublerul şi o riglă metalică subţire.

După trasare se întocmeşte releveul exact al poziţiei tuturor traductoarelor pe urmele trasate. După lipirea traductoarelor se face o verificare a poziţiei acestora faţă de urmele trasate iar eventualele decalaje faţă de urme vor fi menţionate pe releveu.

Scanned with OKEN Scanner

Tot după pregătirea mecanică se face şi o măsurare a dimensiunilor reale ale elementelor deoarece pot exista abateri — chiar în limita toleranţelor admisibile de laminare — care să modifice suprafaţa reală a secţiunii. Această verificare este foarte utilă pentru explicarea unor eventuale anomalii ce se constată cu ocazia prelucrării rezultatelor.

b) *Pregătirea chimică.* După prelucrarea mecanică a suprafeţelor urmează operaţia de curăţire chimică care are ca scop îndepărtarea oricărei urme de murdărie, praf, grăsime etc., astfel încît în momentul aplicării traductoarelor, suprafeţele să fie perfect curate şi neutre din punct de vedere chimic.

Curăţirea începe prin frecarea suprafeţei cu cîrpe uscate pentru îndepărtarea prafului rezultat din frecare cu pînză emeri. Este foarte importantă această curăţire deoarece dacă s-ar şterge direct cu toluol, acest praf s-ar transforma într-o pastă ce aderă pe suprafaţa metalului murdărind-o şi care se îndepărtează destul de greu. Suprafaţa se consideră curată şi se poate trece la curăţirea cu toluol numai cînd ultima cîrpă folosită rămîne curată după frecarea energică a suprafeţei. Cu tamponul înmuiat în toluol se şterge suprafaţa polizată pînă în apropierea marginilor acesteia. Este important să nu se atingă cu tamponul, îmbibat cu toluol, vopseaua din jurul locului curăţat şi nici să nu fie toluol în exces care să se prelingă peste suprafaţa vopsită, pentru a nu transporta vopseaua sau murdărie pe suprafaţa deja curăţată. Curăţirea cu toluol se consideră terminată în momentul în care pe tamponul curat nu apare nici o urmă de murdărie după frecare. În general, două tampoane sînt suficiente pentru o suprafaţă curăţată bine cu cîrpa uscată.

După curăţirea cu toluol suprafaţa se curăţă în continuare cu tampoane îmbibate cu acetonă în acelaşi fel şi cu aceleaşi precauţii ca şi la curăţarea cu toluol. Se recomandă să se folosească acetonă pură „pro analisi", pentru a se obţine o suprafaţă lipsită de urme de impurităţi care ar putea reacţiona cu adezivul folosit la lipirea traductoarelor, modificîndu-i proprietăţile. Suprafaţa curăţată cu acetonă trebuie să fie ceva mai mică decît suprafaţa curăţată anterior cu toluol, deoarece zona de margine nefiind la fel de bine curăţată ca zona centrală, urmele de murdărie ce se găsesc în zona de margine s-ar întinde pe întreaga suprafaţă. De remarcat că, dacă atmosfera este umedă în momentul ştergerii suprafeţei metalice cu tamponul înmuiat în acetonă, după evaporarea acetonei de pe suprafaţa ştearsă, rămîn urme albicioase. În general, la apariţia acestor urme albicioase trebuie avut în vedere ca lipirea traductoarelor să se execute numai după o încălzire prealabilă a locurilor precum şi cu măsuri speciale de protecţie aşa cum se va arăta în cele ce urmează.

În cazul în care este necesară lipirea traductoarelor pe elemente în prealabil încălzite, această încălzire se face înainte de curăţirea chimică. În acest scop se pot folosi fie radianţi cu raze infraroşii, electrici sau cu gaze lichefiate, fie aer cald provenit de la un uscător de păr. În cazul folosirii radianţilor cu raze infraroşii, aceştia se montează la o distanţă convenabilă pentru a nu produce arderea vopselei din jurul locului polizat,

Scanned with OKEN Scanner

pentrucă altfel, substanţele provenite din arderea vopselei se depun pe suprafaţa polizată şi o murdăresc. Încălzirea se face pînă la o temperatură de cca. 45—55°, pentruca după operaţia de curăţire chimică, în momentul lipirii traductoarelor, locul să fie mai cald decît atmosfera, pentru a nu se produce condensări de vapori de apă.

Se atrage atenţia asupra importanţei încălzirii şi uscării preliminare a locului pe care se aplică traductoarele, precum şi asupra uscării traductoarelor pe suport de hîrtie, înainte de lipire, deoarece această operaţie influenţează substanţial mărimea rezistenţei de izolare dintre reţeaua traductorului şi elementul pe care este lipit.

Aplicarea traductoarelor constituie faza cea mai delicată din operaţiile de pregătire a unei încercări tensometrice, deoarece implică rapiditate şi precizie de lucru.

Traductoarele uscate în prealabil cu un curent de aer cald sau cu raze infraroşii, trebuie aplicate pe piesă imediat după curăţirea chimică şi înainte ca aceasta să se răcească la temperatura mediului ambiant. În felul acesta se evită depunerea de praf, fum etc. pe piesa curăţată precum şi condensarea vaporilor de apă din atmosferă care ar compromite calitatea lipirii. La organizarea acestei faze trebuie să se aibă în vedere un front mai mare de lucru pentru ca traductorul lipit să poată fi protejat imediat împotriva umidităţii în acelaşi timp cu lipirea traductorului următor dintr-o secţiune apropiată.

Practic, operaţia de lipire a traductoarelor cu adezivii rapizi Eastman 910 şi Z 70, decurge astfel :

În timp ce un operator curăţă chimic suprafaţa pe care se va aplica primul traductor — suprafaţă încălzită în prealabil cu un radiant cu raze infraroşii — un alt operator pregăteşte traductorul pentru lipire. Această pregătire constă în uscarea traductorului (numai a celor pe suport de hîrtie) cu un curent de aer cald furnizat de un uscător sau cu ajutorul unui radiant cu raze infraroşii şi în aplicarea unei bucăţi de bandă adezivă pe partea exterioară.

Această bandă, care va servi la fixarea provizorie a traductorului şi care este puţin mai îngustă decît traductorul, se lipeşte la capătul opus capătului la care ies firele de conexiune şi depăşeşte cu circa 5 mm marginea traductorului. Toate aceste operaţii ca şi manipulările ulterioare ale traductoarelor trebuie să se facă cu atenţie evitîndu-se atingerea suportului cu mîna. Traductoarele vor fi apucate de firele de conexiune utilizînd în acest scop o pensetă. Dacă în mod accidental suprafaţa posterioară (suprafaţa pe care se aplică adezivul) a fost atinsă cu mîna, aceasta se va şterge cu un tampon umezit în acetonă, prin trecerea rapidă de 2—3 ori fără a fi apăsat.

După terminarea curăţirii chimice a locului unde va fi lipit traductorul — în timp ce acesta continuă să fie uscat — cel de-al treilea operator procedează la neutralizarea suprafeţei. Aceasta se face cu neutralizatorul ce se găseşte de regulă în trusa de adeziv. Se aplică neutralizatorul cu ajutorul unui beţişor cu vată la capăt sau cu un mic tampon de vată

Scanned with OKEN Scanner

manipulat cu o pensetă și se lasă circa un minut. Se șterge apoi excesul de neutralizant și se freacă bine cu o bucăţică de cîrpă curată pînă rămîne perfect uscată.

Se așează apoi traductorul în poziţia exactă în care va trebui să fie lipit și se presează cu degetul capătul de bandă adezivă ce depășește capătul traductorului, fixîndu-l astfel de piesă. Fiind fixat numai la un capăt se ridică traductorul de la capătul celălalt într-o poziţie perpendiculară pe suprafaţa piesei. Menţinîndu-l în această poziţie, ţinîndu-l cu o mînă de firele de conexiune, se aplică acceleratorul pe faţa posterioară cu ajutorul pensulei din dopul flaconului, lăsîndu-se apoi să se usuce în această poziţie. Uscarea acceleratorului se face în circa un minut. La aplicarea acceleratorului trebuie avut grijă să nu se atingă cu pensula faţa lipicioasă a benzii adezive, pentru a nu întinde acest adeziv pe suportul traductorului.

După uscarea acceleratorului se întinde cu ajutorul unei lamele o picătură de adeziv pe suprafaţa metalică și se aplică imediat traductorul presîndu-l prin intermediul unei folii de polietilenă. Presarea se face pentru a îndepărta aerul și excesul de adeziv de sub traductor iar presiunea exercitată trebuie să fie din ce în ce mai mare. Presarea se face cu degetul mare printr-o mișcare de rostogolire, începîndu-se de la capătul fixat cu banda adezivă. Traductorul se menţine presat circa un minut după care se îndepărtează cu îngrijire folia de polietilenă și se ridică firele de conexiune prinse în stratul de adeziv în exces, ieșit de sub traductor în timpul presării.

Cu ajutorul unei lame sau al unui briceag bine ascuţit, se răzuiește excesul de adeziv din jurul traductorului și se face imediat protejarea lui împotriva umidităţii. Îndepărtarea excesului de adeziv este foarte importantă deoarece acesta constituie o cale de pătrundere a umidităţii sub stratul de protecţie, la traductor.

În timpul cît se lipește un traductor ceilalţi doi operatori pregătesc lipirea traductorului următor, realizîndu-se astfel continuitatea operaţiilor și evitarea timpilor morţi.

Aplicarea traductoarelor pe construcţiile de beton se face după cum urmează :

Un operator, pregătește traductorul în vederea aplicării adezivului. Pregătirea constă în asprirea cu ajutorul unei bucăţi de șmirghel suportul din folie de aluminiu al traductorului, după care se curăţă suprafaţa cu un tampon îmbibat în acetonă.

În timpul acesta un alt operator prepară adezivul amestecînd într-un creuzet rășina epoxidică cu întăritorul respectiv în proporţiile riguros necesare. Amestecarea se face cu o baghetă de sticlă. După realizarea unui amestec omogen se întinde un strat subţire de rășină astfel pregătită pe suprafaţa de beton desprăfuită și curăţată chimic în prealabil. În acelaș timp, cel de-al doilea operator întinde un strat subţire de adeziv pe folia de aluminiu a traductorului.

Se aplică apoi traductorul pe stratul de rășină întins pe piesă. Aplicarea se face de la un capăt presîndu-se ușor cu degetele traductorul, astfel încît să nu rămînă bule de aer între cele două straturi de rășină. Se aplică apoi deasupra o foaie de hîrtie cerată sau o folie de polietilenă,

Scanned with OKEN Scanner

se presează uşor cu degetul întregul traductor. Se ţine apoi traductorul presat cu o greutate sau un dispozitiv de presare, prin intermediul unei bucăţi de cauciuc spongios sau de pîslă, circa două ore. Se scoate dispozitivul de presare precum şi folia de polietilenă sau foaia de hîrtie cerată şi se execută protejarea traductorului contra umidităţii. Se obişnuieşte ca o mică cantitate de răşină să se aplice în apropierea locului unde s-a lipit traductorul pentru a putea urmări pe această mostră stadiul de întărire a adezivului şi pentru a aprecia dacă se poate îndepărta dispozitivul de presare. Nepresarea traductorului sau presarea insuficientă conduce la ridicarea marginilor traductorului, deci la o lipire imperfectă.

Trebuie menţionat că operaţiile de pregătire a traductoarelor (asprire, curăţire, aplicarea adezivului) trebuie să se execute pe un suport perfect plan, fără nici o rugozitate care ar putea străpunge suportul de aluminiu al traductorului.

Protejarea traductoarelor contra umidităţii se face — aşa cum s-a arătat mai sus — imediat după lipirea acestora, pentru a evita expunerea lor la acţiunea umidităţii atmosferice. Protejarea se face în mai multe straturi.

Prima protecţie se realizează cu o bandă adezivă de polietilenă. Aceasta se aplică pe traductor pînă la firele de conexiune. Se îndoaie firele de conexiune peste bucata lipită şi se aplică o altă bucată de bandă care acoperă capătul celălalt al traductorului şi circa 7—10 mm din firele de conexiune.

După îndepărtarea excesului de adeziv se aplică cu pensula în jurul traductorului un strat subţire de „Haftgrund“ care se lasă circa 10—15 minute. Se ridică apoi capetele firelor de conexiune în poziţie verticală şi se aplică chitul de cauciuc într-un strat de circa 0,5—1,0 cm. grosime, presîndu-se cu degetele atît pe margine cît şi pe traductor. Trebuie acordată o deosebită atenţie la ieşirea capetelor firelor de conexiune prin stratul de chit, astfel ca acestea să nu fie încrucişate sau să se atingă între ele sub stratul de protecţie. După lipirea capetelor cablului de conexiune, de firele traductorului, se aplică peste regiunea în care firele sînt dezizolate încă un strat de chit de cauciuc (vezi fig. 3.85 în care *1* este traductorul, *2* — firele de capăt, *3* — stratul de protecţie, *4* — cablul de conexiune) după care, atît protecţia cît şi regiunea din jurul traductorului — de pe care vopseaua a fost îndepărtată — se vopsesc cu o vopsea albă pe bază de clorcauciuc. Această vopsire are pe de o parte rolul de a proteja de ruginire metalul curat rămas liber şi, pe de altă parte, de a se putea constata cu uşurinţă dacă traductorul este intact sau dacă nu cumva a fost lovit sau călcat.

În acelaşi timp zona vopsită în alb serveşte pentru a se scrie numărul traductorului respectiv. În cazul temperaturilor scăzute, a umidităţii relativ mari şi în general cînd există pericolul de condensare, protecţia se realizează sub radiant cu raze infraroşii sau sub un curent de aer cald. Altfel, umiditatea prinsă sub stratul de protecţie compromite calitatea lipirii traductorului.

Protecţia traductoarelor lipite pe beton se realizează în acelaş mod, cu menţiunea că, protejarea definitivă nu poate fi începută înainte de

începutul întăririi adezivului — răşina epoxidică — pentru că există posibilitatea să se deplaseze traductorul de la locul său.

În cazul în care condiţiile de mediu sînt favorabile — în laborator, în hale sau încăperi încălzite sau vara în exterior — iar măsurările se efectuează în scurt timp după aplicarea traductoarelor, protecţia cu banda adezivă de polietilenă este suficientă.

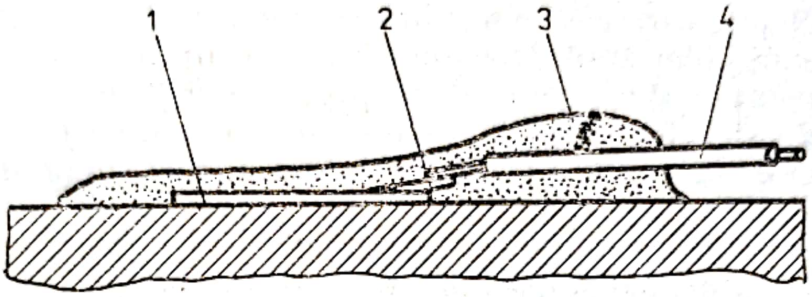


Fig. 3.85.

Dacă însă timpul de folosire a traductoarelor este mai mare de 24—48 ore, se poate realiza o protecţie uşoară cu un strat de adeziv lichid pe bază de cauciuc care se aplică cu pensula pe traductorul lipit şi în jurul lui precum şi pe firele de legătură. În acest caz trebuie luate măsuri ca firele de conexiune ale traductorului să nu fie mişcate pentru a nu le desprinde de stratul de protecţie.

Montarea cablurilor. La montarea cablurilor de legătură la traductoare trebuie avute în vedere două obiective de importanţă deosebită. Primul constă în realizarea unui circuit electric corect, pentru fiecare traductor în parte, iar al doilea obiectiv constă în realizarea unui ansamblu de circuite dispuse în mod ordonat, în aşa fel încît să poată fi identificat cu uşurinţă, oricînd, cablul corespunzător oricărui traductor.

Trebuie acordată atenţia cuvenită realizării unui circuit electric corespunzător pentru fiecare traductor, deoarece se ştie că, prin cablurile de legătură dintre traductoare şi aparatajul de măsură se pot introduce erori de măsurare datorită rezistenţei, reactanţei, izolaţiei şi ecranării lor.

Înainte de lipirea cablului de traductor trebuie luate măsuri de fixarea acestuia cît mai aproapie de traductor pentru ca după lipire, fie prin greutatea proprie fie din cauza mişcării cablului, să nu se producă smulgerea sau deteriorarea traductorului sau a izolaţiei acestuia. În general fixarea cablurilor se face cu sîrmă sau mai rar cu sfoară. După fixarea cablurilor se face lipirea cu cositor de firele de conexiune ale traductoarelor şi se izolează regiunea în care s-a făcut lipitura.

Cablurile se grupează apoi în toroane de cîte 10—15, legîndu-se din loc în loc cu sîrme, pentru a le ţine adunate şi în felul acesta se aduc pînă în punctul în care se montează aparatele. Astfel se obţine pe de o parte o degajare a construcţiei, putîndu-se urmări mai uşor comportarea ei în timpul încercării, pe de altă parte o indentificare mai uşoară a cablurilor ; în plus, strîngerea cablurilor la sfîrşitul lucrării se face mai repede.

Scanned with OKEN Scanner

Identificarea cablurilor se face cu ajutorul unor coliere din tablă de aluminiu sau din tablă albă de 0,2 ... 0,5 mm grosime pe care se imprimă prin poansonare numărul traductorului corespunzător. Operaţia se execută înainte de fixarea cablurilor pe construcţie, însă după numerotarea traductoarelor, fiecare cablu avînd cîte un colier cu numărul respectiv la ambele capete.

Operaţia de cablare este legată de numerotarea traductoarelor care — cum am amintit mai sus — are o mare însemnătate în operaţiile ulterioare de prelucrare a datelor.

Deoarece este foarte utilă identificarea rapidă a oricărui traductor atît în timpul încercărilor cît şi ulterior, întreg personalul trebuie să cunoască poziţia oricărui traductor după numărul pe care-l poartă. Din acest motiv numerotarea nu trebuie făcută la întîmplare, ci după criterii cît mai logice, ţinînd seama de elementele asemenea şi de eventuale simetrii.

Criteriile de numerotare se stabilesc de la caz la caz pentru fiecare lucrare în funcţie de complexitatea construcţiei, a numărului de secţiuni şi a numărului de traductoare.

După terminarea operaţiilor de cablare se face verificarea rezistenţelor de izolaţie între traductoare şi construcţie. Aceste valori se înscriu pe o foaie ce constituie un document primar al încercării şi se anexează la dosarul de casă al lucrării. În cazul unor rezistenţe de izolaţie insuficiente se înlocuieşte traductorul sau se remediază defecţiunea şi se montează cablurile la aparate.

Legarea cablurilor la aparate se face fie prin lipire cu cositor fie prin strîngerea la bornele acestora. În acest caz capetele firelor trebuie să fie curate şi răsucite pentru a se realiza un contact electric cît mai bun şi pentru ca firele răzleţe să nu intre în filetul bornelor. Capetele de fire oxidate se îndepărtează sau se curăţă prin frecare cu o bucăţică de şmirghel.

Se notează de către responsabilul de temă numerele traductoarelor corespunzătoare fiecărui canal în parte. Orice modificare în ordinea introducerii pe aparate se face numai cu ştirea responsabiliului de lucrare, care operează imediat, în foi, schimbarea produsă.

3.7.4. ORGANIZAREA ŞI EFECTUAREA MĂSURĂRILOR ÎN REGIM STATIC

Executarea unor măsurări cu cîteva traductoare şi în condiţii de laborator nu ridică probleme deosebite; este necesar numai să se efectueze mai multe încercări pentru a avea suficiente date şi pentru a putea elimina eventualele erori de citire. Se recomandă să se efectueze cel puţin trei citiri iar cînd dispersia valorilor este mare să se efectueze un număr mai mare de citiri.

La încercările de amploare, la care numărul de traductoare este mare (de ordinul sutelor), organizarea efectuării măsurărilor devine o problemă mai complicată. În asemenea cazuri, de regulă se depăşeşte capacitatea instalaţiilor tensometrice de care se dispune, din care cauză trebuie executate încercări repetate, însoţite de măsurări pe grupe de traductoare,

Scanned with OKEN Scanner

fiecare grupă conținînd un număr de traductoare egal sau mai mic cu numărul de canale ale instalațiilor de măsură (este bine să se păstreze cîteva canale libere ca o rezervă pentru înlocuirea canalelor, ce eventual s-ar defecta în timpul măsurărilor).

La alcătuirea acestor grupe se va ține seama de caracteristicile traductoarelor și ale aparatelor de măsură, de plasarea traductoarelor în secțiuni și pe elemente, de lungimile cablurilor. Un număr de traductoare va fi comun la două sau mai multe grupe.

Este evident că volumul măsurărilor se mărește deoarece pentru aceiași situație de încărcare trebuie făcute mai multe schimburi de grupe de traductoare pe aparate.

Traductoarele comune mai multor grupe, și care rămîn în continuare montate pe aparate pentru a se măsura odată cu fiecare grup de traductoare, permit să se realizeze o „suprapunere" a rezultatelor. Prin aceasta se poate face controlul reproducerii exacte a încărcării sau, în cazul în care o asemenea reproducere nu este realizabilă, se pot efectua corecțiile cu ocazia calculelor ulterioare.

Pentru buna desfășurare a seriilor de măsurări (care uneori pot fi de ordinul zecilor) și pentru înregistrarea fidelă a rezultatelor obținute, sînt necesare măsuri de organizare atît a efectuării măsurărilor cît și a evidenței primare a rezultatelor.

În acest sens va trebui ca înainte de începerea măsurărilor, cablurile ce vin de la traductoare să fie grupate așa cum vor fi montate pe aparate. În felul acesta se va scurta mult timpul de schimbare a grupelor de traductoare și se va reduce posibilitatea montării greșite a cablurilor pe aparate.

Pentru evidența încercărilor și a rezultatelor sînt necesare : un desfășurător al tuturor traductoarelor în care se notează, la fiecare serie de măsurări, traductoarele folosite, avînd astfel în permanență evidența traductoarelor care mai trebuie introduse în aparate; fișe de înregistrare a indicațiilor aparatelor la fiecare încercare în parte; un concentrator care cuprinde toate traductoarele și în care se trec valorile citite la fiecare măsurare. Conducătorul (responsabilul) lucrării, întocmește pe baza desfășurătorului și a concentratorului, programul măsurărilor și fișele de înregistrare a citirilor pentru fiecare aparat și care conțin numerele traductoarelor introduse în aparatura respectivă, în ordinea numerotării canalelor, tipul și seria punții și a cutiilor de comutare, data efectuării încercării, constanta traductoarelor (cînd se folosesc traductoare cu constantă diferită) și valoarea constantei fixate la aparat.

Aceste fișe se înmînează din timp operatorilor respectivi, pentru ca aceștia să aibă posibilitatea să controleze traductoarele din punct de vedere al continuității și al rezistenței de izolare, să introducă cablurile pe aparate și să facă echilibrarea, iar în caz de defecțiune la vre-un traductor să remedieze defectul sau să înlocuiască traductorul.

Înainte de prima încărcare se face o ultimă echilibrare a punților și o citire inițială. După încărcarea construcției se face încă o citire, după care se face o nouă echilibrare a punților în această situație. După echilibrare se face citirea și se descarcă construcția, citindu-se din nou. Valorile

Scanned with OKEN Scanner

obținute la descărcare vor trebui să fie egale și de semn schimbat cu cele obținute la încărcare. Acest sistem de lucru — cu echilibrări intermediare — este recomandat în special cînd nu este impus un ritm de lucru accelerat. În cazul cînd timpul afectat măsurărilor este limitat, nu se mai face echilibrarea în poziția încărcat ci doar citirea, după care se descarcă și se citește din nou. În acest caz valorile citite în poziția descărcat — înainte și după încărcare — trebuie să fie egale. În sistemul fără echilibrări intermediare, citirile trebuie efectuate cu o deosebită atenție și în orice caz vor trebui repetate încărcările.

Coordonarea încercărilor o va face conducătorul lucrării care urmărește și notează operațiile de încărcare și descărcare, dictează începerea citirilor, echilibrările intermediare, repetarea operațiilor, etc. Se recomandă ca, dacă este posibil, înainte de a începe măsurările să se facă o încercare a structurii pentru a face ca traductoarele să lucreze mai bine.

La încercările efectuate în exterior trebuie luate măsuri pentru evitarea sau reducerea influențelor variațiilor de temperatură.

În acest scop operațiile de încărcare, respectiv descărcare, trebuie efectuate într-un timp cît mai scurt; dacă operația de încărcare durează mult mai mult decît descărcarea, se vor lua în considerare mai mult sau numai rezultatele obținute la descărcare. De exemplu, în cazul recipienților, efectul greutății lichidului din recipient se stabilește măsurînd deformațiile specifice în urma golirii recipienților și nu la umplerea lor, cînd pot interveni variații mari de temperatură în timpul măsurării atît din cauza duratei mari de umplere cît și din cauza diferenței dintre temperatura pereților recipientului și aceea a apei care se introduce în recipient.

La marile structuri, ale căror elemente pot fi expuse în mod diferit razelor soarelui, se recomandă ca măsurările să fie efectuate noaptea, de preferință spre dimineață (înainte de răsăritul soarelui) cînd se ajunge la o mai bună stabilitate termică.

3.7.5. ORGANIZAREA ȘI EFECTUAREA MĂSURĂRILOR ÎN REGIM DINAMIC

Alegerea aparaturii pentru măsurarea fenomenelor dinamice cu frecvențe mari. Pentru măsurarea, respectiv înregistrarea fenomenelor dinamice a căror frecvență este ridicată (de ordinul sutelor sau miilor de Hz) este necesar ca atît întregul amplificator tensometric (fiecare bloc în parte) cît și instalația de înregistrare să poată reda aceste frecvențe.

Așa cum s-a arătat în § 3.6 instalația de înregistrare lipsită practic de inerție mecanică este oscilograful catodic; acesta poate reda frecvențe de ordinul miilor de Hz fără a introduce distorsiuni liniare. În schimb, el nu poate înregistra fenomene dinamice de joasă frecvență decît dacă este special construit în acest scop.

Oscilograful magnetic (cu bucle) poate reda frecvențe pînă la ordinul sutelor de herți, în funcție de caracteristicile buclelor.

Inscriptorul direct nu poate reda decît fenomene dinamice a căror frecvență este de cîteva zeci de herți; deci acest tip de înregistrator nu este indicat pentru măsurarea fenomenelor ce variază rapid în timp.

Scanned with OKEN Scanner

În cele ce urmează vor fi prezentate unele considerații privind alegerea tipului de instalație adecvat:

a) *Amplificatorul de curent alternativ*, trebuie să aibă o bandă de trecere suficient de mare pentru a putea măsura frecvențele ridicate. Banda de trecere a unui amplificator de curent alternativ la o instalație a cărui oscilator lucrează pe frecvența f_0 trebuie să aibă o extindere de la $f_0 - f_1$ pînă la $f_0 + f_1$ (cu f_1 s-a notat frecvența fenomenului mecanic de măsurat).

Dacă această condiție nu este respectată amplificatorul de curent alternativ va introduce distorsiuni liniare. De exemplu, dacă frecvența oscilatorului este $f_0 = 5000$ Hz și frecvența fenomenului mecanic care trebuie măsurat este $f_1 = 300$ Hz, amplificatorul de curent alternativ trebuie să aibă o bandă de trecere (fără atenuări în această bandă) extinsă de la 4700 Hz pînă la 5300 Hz.

b) *Oscilatorul* trebuie să lucreze pe o frecvență f_0 de cel puțin cinci ori mai mare decît frecvența f_1 a fenomenului mecanic măsurat.

Pentru siguranță unii constructori de aparate aleg raportul $\frac{f_0}{f_1} = 10$. De exemplu, dacă frecvența fenomenului dinamic este de 400 Hz, este recomandabil ca oscilatorul să lucreze pe o frecvență de aproximativ $10 \times 400 = 4.000$ Hz.

Din acest motiv unele firme (ex.: Hottinger-Baldwin) au conceput două tipuri de amplificatoare tensometrice: un tip cu frecvență purtătoare de 5 kHz și alt tip cu frecvența purtătoare de 50 kHz care poate măsura deci, fenomene cu frecvențe de circa zece ori mai mari decît primul.

Se menționează că la măsurarea fenomenelor a căror frecvență este ridicată, datorită faptului că frecvența purtătoare are valori mari, intervin dezechilibrări mari de fază, puntea de traductoare fiind cu atît mai sensibilă la aceste dezechilibrări cu cît frecvența este mai mare.

c) *Detectorul sensibil la fază* (diodele din inelul de demodulare) trebuie să aibă o capacitate proprie cu atît mai mică cu cît frecvența oscilatorului este mai ridicată, deoarece capacitatea diodelor intervine ca un șunt la ieșirea amplificatorului de curent alternativ. Din acest motiv, în etajele de direcție ale amplificatoarelor tensometrice destinate măsurării fenomenelor cu frecvențe ridicate, nu sînt folosite tuburi electronice ci diode cu germaniu cu contact punctiform. Tot din acest motiv nu se folosesc diodele cu joncțiune, acestea avînd capacitate proprie mare.

d) *Înregistratorul*; pentru înregistrări pe un singur canal ale fenomenelor dinamice de frecvență ridicată se preferă folosirea oscilografului catodic. Se menționează că oscilograful catodic are montat în serie, la intrarea sa, un condensator, din care cauză nu poate măsura componente continue (statice) iar cele dinamice a căror frecvență este de ordinul herților sînt înregistrate cu erori de amplitudine.

În cazul în care se măsoară fenomene dinamice cu frecvențe ridicate în mai multe puncte simultan se recomandă utilizarea oscilografelor catodice cu mai multe canale.

Scanned with OKEN Scanner

Se pot folosi de asemenea oscilografe magnetice (cu bucle) cu condiţia ca buclele să poată reda fără distorsiuni liniare fenomene de frecvenţă ridicată.

Se atrage atenţia că o buclă are o anumită frecvenţă de rezonanţă mecanică şi o anumită frecvenţă de rezonanţă electrică ; aceste frecvenţe nu trebuie să se afle în nici un caz în domeniul frecvenţelor de înregistrat. În cataloage, firmele producătoare indică frecvenţa maximă de lucru pentru fiecare tip de buclă.

Aparatura pentru măsurarea fenomenelor de şoc. Pentru măsurarea fenomenelor de şoc sînt valabile consideraţiile arătate la paragraful precedent cu menţiunea că amplificatorul de curent alternativ trebuie să aibă o bandă de trecere foarte largă iar înregistrarea trebuie făcută cu un oscilograf catodic de foarte joasă frecvenţă cu banda de trecere largă, special construit în acest scop.

Comutatorul regimului de funcţionare este prevăzut cu o poziţie de lucru în care generatorul de baleiaj execută o singură oscilaţie, deplasînd spotul de la stînga spre dreapta ecranului.

Înregistrarea fenomenelor rapide (şocuri, percuţii, ciocniri etc.) nu se face cu aparatul de filmat ci cu un aparat de fotografiat (cu film sau plăci).

Se atrage atenţia că dacă un singur bloc din lanţul de transmitere a semnalului nu satisface condiţiile enumerate la § 3.6.2 şi § 3.6.3, înregistrarea se face cu erori mari.

Măsurarea fenomenelor variabile cu ajutorul oscilografului catodic. Pentru obţinerea unei sensibilităţi cît mai mari la înregistrarea cu oscilograful catodic a fenomenelor şi în special a deformaţiilor specifice variabile în timp, se recomandă, în cazul utilizării punţilor care nu dau la ieşire semnale demodulate, să se lucreze cupă cum urmează :

a) *La reglajele dinaintea măsurărilor* :

— se conectează traductoarele la amplificatorul tensometric şi se efectuează echilibrarea obişnuită (rezistivă şi capacitivă) cu ajutorul instrumentului indicator, ca în cazul măsurărilor statice ;

— se conectează oscilograful catodic (după legarea lui la pămînt) şi, după ce ieşirea amplificatorului tensometric a fost comutată pe „măsurări dinamice", se rectifică echilibrarea cu ajutorul oscilografului, pe ecranul căruia trebuie să apară o linie dreaptă (fig. 3.86, a) ; cu ajutorul butonului pentru deplasarea pe verticală a spotului se aduce imaginea (linia dreaptă) la marginea inferioară a ecranului (fig. 3.86, b) ;

— se estimează valorile extreme ale deformaţiilor specifice ce ar putea să apară în timpul măsurărilor ; de exemplu :

$$\varepsilon_{max} = + 500 \cdot 10^{-6} \text{ şi } \varepsilon_{min} = - 100 \cdot 10^{-6};$$

— se dă din amplificator un dezechilibru $\varepsilon = \varepsilon_{max} + \varepsilon_0$, în care $\varepsilon_0 \geqslant |\varepsilon_{min}|$ în cazul cînd $\varepsilon_{min} < 0$ şi $\varepsilon_0 = 0$ dacă $\varepsilon_{min} \geqslant 0$; în cazul de faţă $\varepsilon_{min} = - 100 \times 10^{-6}$, deci dezechilibrul ce se va da va fi $\varepsilon = (500 + 100) \times 10^{-6} = 600 \times 10^{-6}$; pe ecranul osciloscopului imaginea poate să apară ca în figura 3.86, c ;

Scanned with OKEN Scanner

— se manevrează atenuatorul osciloscopului pînă cînd marginea superioară a imaginii ocupă o poziţie convenabilă în ecran (fig. 3.86, d). În acest fel a fost stabilită la osciloscop sensibilitatea optimă pentru înregistrare. În cursul măsurărilor nu se va mai acţiona asupra butoanelor atenuatorului;

— se echilibrează din nou amplificatorul tensometric controlîndu-se poziţia liniei drepte obţinute (care trebuie să fie ca în fig. 3.86. a) şi apoi

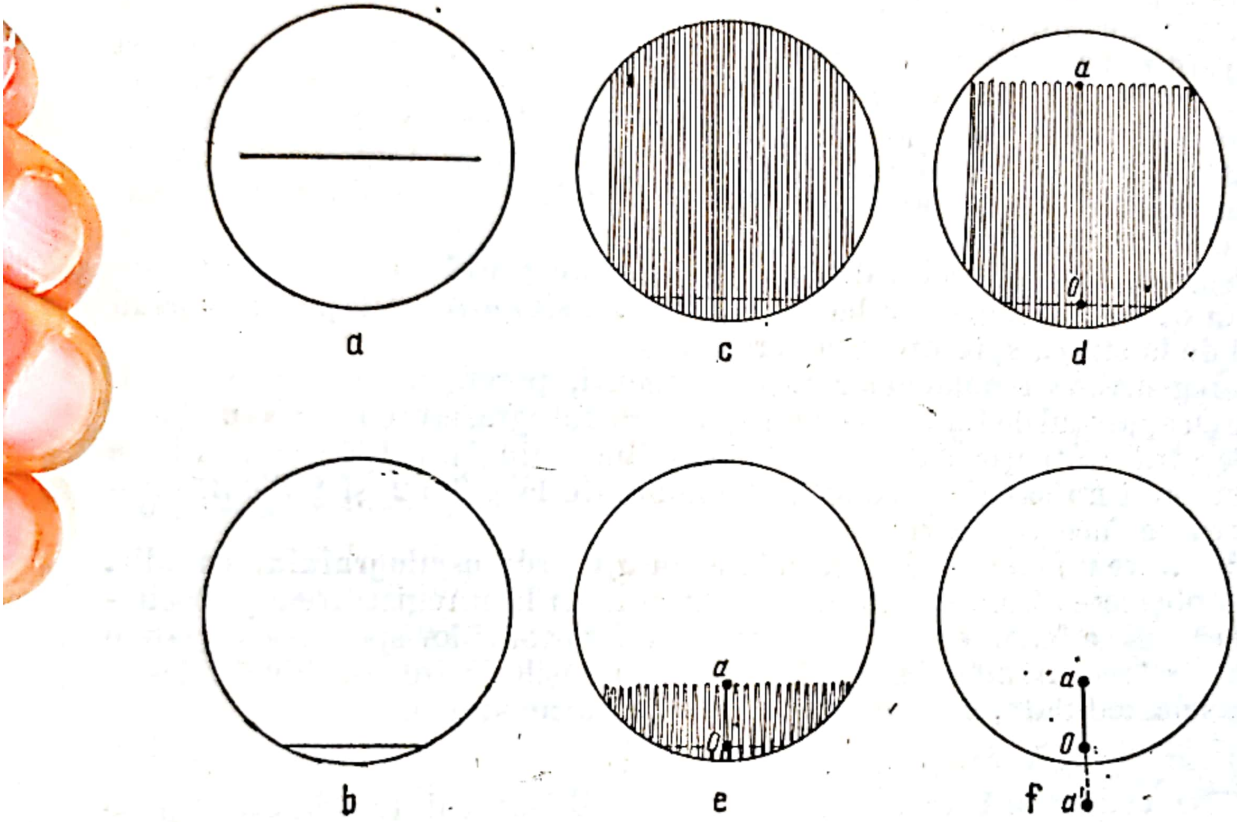


Fig. 3.86.

se dă un dezechilibru egal cu ε_0 (se reaminteşte că $\varepsilon_0 = 0$ în cazul ciclurilor oscilante) obţinîndu-se imaginea din figura 3.86, e. Este necesar să se dea un dezechilibru iniţial ε_0 pentru a se putea determina semnele variaţiilor ce urmează a fi măsurate. Dacă măsurările s-ar face cu puntea echilibrată iniţial, din oscilogramă nu s-ar putea evalua decît valoarea *absolută* a deformaţiei (fig. 3.87);

— se scoate din funcţiune generatorul de baleiaj. Pe ecran apare o dreaptă aa' (fig. 3.86, f). Punctul a va fi acela care va trasa linia de zero înaintea măsurărilor şi variaţia eforturilor dinamice în cursul măsurărilor;

— se estimează frecvenţa fenomenului dinamic în vederea stabilirii vitezei de filmare. Fie f această frecvenţă. Dacă se alege o lungime d (pe film) corespunzătoare unei semiperioade, rezultă că viteza necesară trebuie să fie

$$v = \frac{d}{t} = \frac{d}{\frac{T}{2}} = \frac{2d}{T} = 2df$$

în care : v este viteza de filmare (cm/s)

d — lungimea măsurată pe film corespunzătoare unei semiperioade (cm)

f — frecvența fenomenului dinamic (Hz).

De exemplu, dacă $d = 1{,}5$ cm și $f = 20$ Hz, rezultă $v = 2 \times 1{,}5 \times 20 = 60$ cm/s $= 0{,}6$ m/s ;

— se încarcă casetele cu film. Se recomandă filmele sensibilizate pancromatic sau ortopancromatic cu sensibilitatea de 21/10° DIN. Aceleași

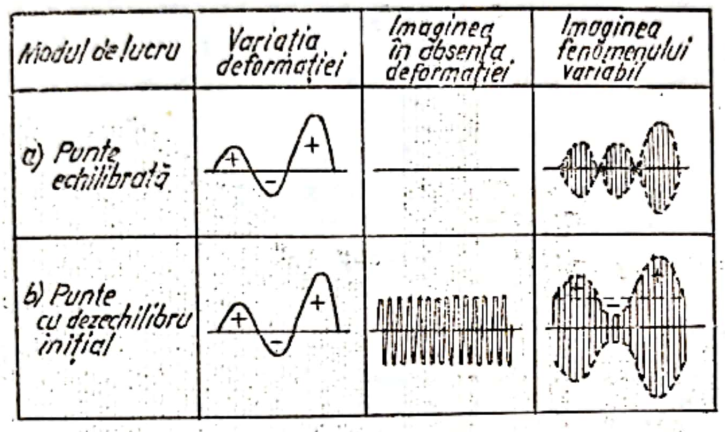


Fig. 3.87.

rezultate pot fi obținute cu filme sensibilizate ortocromatic, de aceeași sensibilitate, numai în cazul ecranelor cu spot de culoare albastră. Se montează casetele în aparatul de filmat.

b) *La efectuarea înregistrărilor* :

— se înregistrează linia de zero. Pornind aparatul de filmat punctul a din fig. 3.86, f trasează linia a_0a_1 pe oscilogramă (fig. 3.88) ;

— se înregistrează semnalele de tarare dînd dezechilibrări cunoscute (de exemplu : $\varepsilon_t = -100, -50, 0, +50, +100, +500$, ε_t fiind exprimat în μm/m). Aceste semnale apar în oscilogramă ca segmente b_1b_2 respectiv c_2c_3, d_3d_4, etc...

Observație. Distanțele pe oscilogramă corespunzătoare deformațiilor specifice se măsoară (în mm) *întotdeauna față de linia de zero* (a_0a_1 din fig. 3.88) ;

— se revine la poziția inițială (linia de zero : a_0a_1) și se încep înregistrările fenomenelor dinamice, obținînd curba $\lambda\lambda'$ corespunzătoare variațiilor fenomenului de măsurat ;

— în timpul măsurărilor nu este posibilă marcarea evenimentelor sau efectuarea de notări pe film. Dacă aceasta este neapărat necesar se va opri motorașul de antrenarea filmului și se va deschide fereastra de control voalînd filmul pe o mică porțiune și notînd prin zgîriere un semn convențional pe film.

Scanned with OKEN Scanner

Măsurarea și evaluarea fenomenelor dinamice cu ajutorul oscilografului magnetic. În acest caz se procedează astfel :

a) *La reglajele dinaintea măsurărilor* :

— se conectează traductoarele (rezistive sau inductive) și se face echilibrarea (rezistivă și de compensare a fazei) pe fiecare canal în parte, cu ajutorul instrumentului indicator al amplificatorului tensometric;

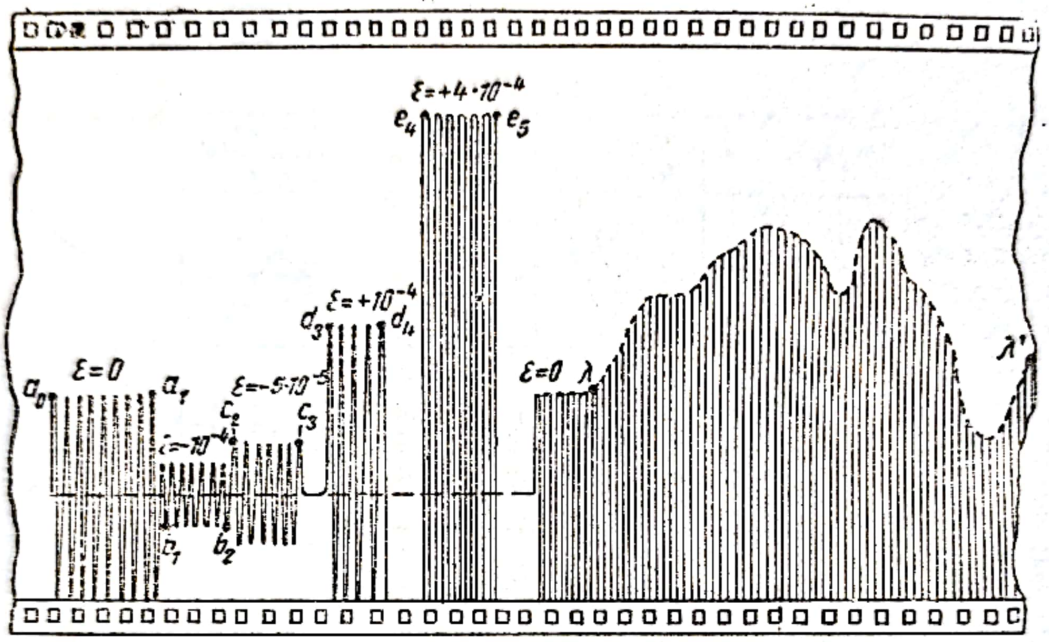


Fig. 3.88.

— se trec comutatoarele amplificatorului în pozițiile „măsurări dinamice", respectiv „ieșire pentru oscilograf magnetic". Trebuie făcute cîteva precizări :

1°. Conectarea oscilogramelor magnetice nu este posibilă la toate tipurile de amplificatoare (punți) tensometrice. Unele din acestea (de exemplu punțile „ORION" sau „KOVO") nu permit conectarea oscilografelor magnetice și nu au în consecință borne de ieșire pentru acest tip de oscilografe.

2°. Unele amplificatoare (punți) tensometrice sînt destinate *numai* pentru efectuarea încercărilor dinamice dar nu toate permit conectarea traductoarelor inductive.

3°. Buclele (galvanometrele cu oglindă) ale oscilografelor magnetice trebuie adaptate la amplificatorul tensometric astfel încît rezistența de ieșire a amplificatorului să fie egală cu rezistența buclei. Dacă între amplificator și oscilograf se intercalează un filtru, atunci condiția susamintită se extinde și asupra rezistenței caracteristice a acestuia, astfel încît rezistența de ieșire a amplificatorului să fie egală cu rezistența caracteristică a filtrului și cu rezistența buclei (galvanometrului). În cazul în care nu este respectată această egalitate *apar erori de neadaptare*. De aceea, în cazul în care buclele utilizate nu se pot adapta numai cu elemen-

Scanned with OKEN Scanner

tele existente în amplificator, trebuie făcută o adaptare cu rezistențe suplimentare montate în serie și în paralel pe ieșirea amplificatorului. Pentru amplificatoarele tensometrice și buclele livrate de firma Hottinger-Baldwin, au fost întocmite nomograme cu ajutorul cărora se determină rapid rezistențele necesare pentru adaptare (fig. 3.59...3.62). Aceste nomograme pot fi utilizate la orice amplificator tensometric și orice tip de buclă dacă se cunosc caracteristicile acestora;

— se estimează valorile extreme ale deformațiilor, mai ales cele corespunzătoare buclelor de la cele două margini ale oscilogramei, astfel încît ele să nu depășească marginile acesteia în cursul încercărilor (spotul să nu „iasă afară" din oscilogramă). În acest scop se recomandă ca buclele dinspre mijlocul oscilogramei să se monteze la canalele ce dau variații mai mari. Această operațiune de „ordonare" a spoturilor s-a dovedit foarte necesară, deoarece o ordonare nejudicioasă duce la repetarea încercării.

Cînd este posibil, este bine să se facă mai întîi o *încercare de probă*, urmărind deplasarea spoturilor cu ochiul liber, fără a se face înregistrarea. Spoturile ce eventual ar depăși marginile oscilogramei în cursul acestor încercări preliminare, vor fi aduse spre mijlocul hîrtiei (în poziție de repaos). În acest scop buclele sînt prevăzute cu șuruburi de reglare a poziției. O altă posibilitate pentru evitarea depășirii de către unele spoturi a marginilor oscilogramei este reducerea amplificării în canalele corespunzătoare acestor spoturi, dar aceasta poate aduce cu sine dificultăți la interpretarea oscilogramei, mai ales dacă trebuie evaluate și amplitudinile mici.

Folosirea oscilografelor magnetice cu raze ultraviolete, așa cum s-a mai arătat, ușurează mult operațiunile de reglare întrucît oscilograma apare imediat, nefiind necesară developarea ei. În cazul în care unele spoturi depășesc cadrul oscilogramei, aceasta se poate vedea chiar în cursul încercării. Se poate astfel face reglajul, repetînd imediat măsurarea. Acesta este avantajul esențial al acestor tipuri de oscilografe (de exemplu oscilograful tip „Visicorder");

— se verifică dacă, pentru același fel de efort (de exemplu compresiune), toate spoturile deviază pe oscilogramă în același sens. De asemenea se verifică dacă se menține acest sens în cazul în care se dă un semnal de tarare.

Observație. O atenție deosebită se va da verificării canalului în care se înlocuiește o buclă. Se poate ca pentru vechea buclă, un anumit efort (de exemplu, compresiune), să dea o deviație într-un anumit sens (de exemplu, spre stînga), iar același efort să dea o deviație de sens contrar pe noua buclă (de exemplu spre dreapta).

S-ar putea lua astfel un efort real de *compresiune* ca fiind de *întindere!* Această anomalie se datorește faptului că în procesul de fabricație a buclelor nu s-a respectat *același sens de bobinare* al bobinei mobile;

— se încarcă casetele cu hîrtia specială pentru înregistrare și se montează casetele în oscilograf;

— se reglează intensitatea luminoasă a spoturilor. Acestui fapt i se va da o deosebită atenție mai ales cînd se utilizează oscilografe care

Scanned with OKEN Scanner

au ca sursă de lumină becuri incandescente şi încercarea nu se mai poate repeta. Intensitatea luminoasă a spoturilor nu trebuie să fie nici prea mare (apar dificultăţi la interpretare din cauza grosimii spoturilor), nici prea mică (developată, hîrtia apare albă).

Reglarea intensităţii luminoase se va efectua în stare descărcată (fără sarcini dinamice). Dacă în ciuda reducerii intensităţii, spoturile au aspectul unor „pete" sau „linii" (în loc de a fi punctiforme) se va controla valabilitatea ecranărilor şi legăturilor la pămînt. Existenţa unor oscilaţii perturbatoare induse din reţea poate provoca aspectul de „pată" sau „linie" a spotului;

— se determină şi se reglează viteza necesară pentru derularea hîrtiei (cu relaţia stabilită mai sus : $v = 2df$).

b) *La efectuarea înregistrărilor* : pentru fiecare buclă se va proceda ca la punctul b din paragraful precedent. Spre deosebire de oscilografele catodice, la oscilografele magnetice există un dispozitiv de marcare a evenimentelor pe film. În acest scop în oscilograf se află o buclă care trasează o linie dreaptă; în momentul apăsării unui buton, pentru marcarea unui eveniment, bucla face un salt brusc.

Ca perfecţionări ale oscilografelor magnetice (de exemplu la instalaţia „Telec") se citează : dispozitivul de marcare a tipului pe oscilogramă, contorul de ture, cutia pentru comanda de la distanţă a oscilografului şi dispozitivul de identificare a canalelor (buclelor).

Există situaţii în care operatorul trebuie să marcheze cu precizie pe oscilogramă un anumit eveniment şi nu are o vizibilitate bună a locului în care se petrece evenimentul. În acest caz se va recurge la improvizarea unor dispozitive (contacte cu elemente elastice) care să-i permită totuşi înregistrarea precisă a acestui eveniment.

3.8. PRELUCRAREA ŞI INTERPRETAREA REZULTATELOR MĂSURĂRILOR

3.8.1. STABILIREA TENSIUNILOR NORMALE DIN SECŢIUNILE BARELOR

În cazul barelor, drepte sau curbe, tensiunile normale dirijate după axa barei se determină aplicînd traductoare orientate după această axă. La barele din profile laminate, dacă traductoarele sînt plasate în apropierea colţurilor secţiunii, unde tensiunile tangenţiale sînt nule, deformaţiile specifice măsurate cu aceste traductoare reprezintă deformaţii principale astfel că tensiunile normale se calculează cu relaţia :

$$\sigma = E\varepsilon \tag{3.59}$$

în care : E este modul de elasticitate al materialului
ε — deformaţia specifică după direcţia axei barei.

Deformaţia specifică ε se determină din cele două indicaţii ale amplificatorului tensometric dinainte de încărcare şi după încărcarea piesei, astfel :

— dacă la puntea tensometrică se racordează un traductor activ (aplicat pe bară) şi un traductor de compensare ce a fost aplicat pe o altă piesă (nesolicitată) decît bara respectivă şi dacă potenţiometrul punţii poate fi reglat la valoarea constantei traductorului, deformaţia specifică ε este :

$$\varepsilon = \varepsilon_{cit} = i_1 - i_0$$

unde :

ε_{cit} este deformaţia specifică rezultată direct din indicaţiile punţii tensometrice

i_0 — indicaţia punţii înainte de încărcarea barei ; (la punţile tensometrice care lucrează prin metoda deviaţiei, $i_0 = 0$, dacă în prealabil s-a făcut echilibrarea rezistivă şi capacitivă) ;

i_1 — indicaţia punţii după încărcarea barei ;

— dacă în loc de constanta k a traductorului potenţiometrul punţii nu se poate regla decît la o valoare k', deformaţia specifică ε se obţine din relaţia

$$\varepsilon = \frac{k'}{k} \cdot \varepsilon_{cit} ; \tag{3.60}$$

— dacă pentru a obţine o precizie mai mare a măsurării, traductorul de compensare se aplică tot pe bara solicitată, lîngă traductorul activ, orientat perpendicular pe direcţia acestuia, (sau se utilizează o rozetă cu două traductoare perpendiculare) ;

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{cit}}{1 + \mu} \tag{3.61}$$

unde μ este coeficientul lui Poisson.

Într-adevăr, cu traductorul activ se măsoară o deformaţie specifică $\varepsilon_a = \varepsilon$ iar cu traductorul de compensare se măsoară o deformaţie $\varepsilon_c = -\mu\varepsilon$ astfel încît

$$\varepsilon_{cit} = \varepsilon_a - \varepsilon_c = \varepsilon(1 + \mu). \tag{3.62}$$

Cunoscînd valoarea lui ε, se determină efortul unitar cu relaţia (3.59).

3.8.2. DETERMINAREA TENSIUNILOR MAXIME ÎN SECŢIUNILE BARELOR DIN PROFILE LAMINATE

La secţiunile barelor din profile laminate tensiunea maximă are loc într-unul din colţurile secţiunii. Pentru determinarea acestei tensiuni se aplică pe laturile secţiunii respective cîte două traductoare tensometrice. Dacă pe una din aceste laturi de lungime l s-au aplicat traductoarele *1* şi *2* situate la distanţele a_1 şi a_2 de extremităţile A şi B ale laturii

Scanned with OKEN Scanner

(fig. 3.89) ţinînd seamă ca variaţia tensiunilor de-a lungul oricărei laturi este liniară, se determină tensiunile σ_A şi σ_B la extremităţi, cu relaţiile:

$$\sigma_A = \sigma_1 + \frac{a_1}{l - a_1 - a_2}(\sigma_1 - \sigma_2)$$
$$\sigma_B = \sigma_2 + \frac{a_2}{l - a_1 - a_2}(\sigma_2 - \sigma_1) \qquad (3.63)$$

în care σ_1 şi σ_2 sînt tensiunile determinate pe baza indicaţiilor traductoarelor *1* şi *2*.

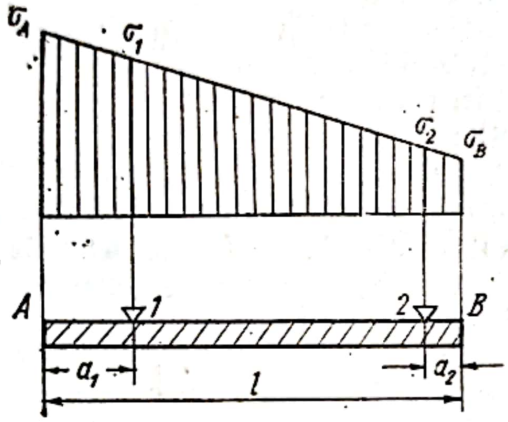


Fig. 3.89.

Efectuînd aceste determinări şi pentru celelalte laturi ale secţiunii se stabileşte punctul cel mai solicitat şi tensiunea maximă din secţiunea respectivă.

3.8.3. DETERMINAREA TENSIUNILOR PRINCIPALE ÎN CAZUL STĂRII PLANE DE SOLICITARE

În cazul stării plane de solicitare este necesar să se determine într-un punct deformaţiile specifice după cel puţin trei direcţii, pentru a putea apoi stabili prin calcul direcţiile principale, deformaţiile specifice principale şi tensiunile principale corespunzătoare, cu ajutorul relaţiilor cunoscute din teoria elasticităţii prezentate la § 1.4.3.

Măsurînd deformaţiile specifice ε_1, ε_2, ε_3 după trei direcţii ce fac unghiurile φ_1, φ_2, φ_3 cu axa Ox se obţin trei relaţii din care se determină valorile lui ε_x, ε_y şi γ_{xy} şi apoi, cu acestea valorile deformaţiilor specifice principale şi ale eforturilor unitare corespunzătoare.

Pentru simplificarea calculului se aleg, astfel cum s-a arătat la § 1.4.4. pentru cele trei direcţii, anumite unghiuri φ_1, φ_2, φ_3 stabilite dinainte. În acest scop se realizează rozetele tensometrice, care au cel puţin trei reţele tensosensibile, aşezate după anumite direcţii pe acelaşi suport, ceea ce permite o lipire mai rapidă şi mai precisă decît în cazul folosirii a trei traductoare simple.

Scanned with OKEN Scanner

După felul cum sînt aşezate reţelele tensosensibile pe suport, se deosebesc (v. § 1.4.5.) rozete dreptunghiulare sau în stea (la care cele trei reţele fac între ele unghiuri de 45°), rozete triunghiulare sau delta (la care reţelele formează un triunghiu echilateral), rozete T-delta (care sînt formate din patru reţele simple) etc.

Determinarea direcţiilor, deformaţiilor şi eforturilor unitare principale se poate face analitic cu relaţiile din tabelele 1.4 şi 1.5 sau grafic construind cercul lui Mohr.

3.8.4. SCHEME DE AMPLASARE PE BARE ŞI DE RACORDARE ÎN PUNTE A TRADUCTOARELOR TENSOMETRICE, ÎN CAZUL SOLICITĂRILOR COMPUSE

În general, piesele de maşini şi elementele de construcţii sînt supuse la mai multe solicitări simultan, astfel că traductoarele plasate pe o asemenea piesă indică o deformaţie specifică ε ce reprezintă suma algebrică a deformaţiilor specifice corespunzătoare fiecărei solicitări în parte.

Adesea atît cercetătorul cît şi constructorul sînt interesaţi să afle una sau mai multe din componentele deformaţiei specifice totale. De exemplu, în cazul unui arbore supus la răsucire şi simultan la încovoiere şi întindere, trebuie separate componentele deformaţiei corespunzătoare fiecăreia din cele trei solicitări: răsucire, încovoiere şi întindere. Deoarece traductorul tensometric aplicat pe piesă măsoară simultan toate componentele deformaţiei specifice, nu este posibil să se stabilească cu ajutorul unui singur traductor, în mod separat, mărimea componentelor deformaţiei. Separarea acestor componente ale deformaţiei specifice complexe din punctele secţiunii unei piese se poate face numai dacă se aplică în secţiunea respectivă mai multe traductoare tensometrice.

Pentru cazul general, al secţiunilor de o formă oarecare, această separare a componentelor deformaţiei specifice se poate face numai prin calcul, folosind relaţiile cunoscute ce dau tensiunea într-un punct al secţiunii solicitate complex.

În cazul particular al secţiunilor cu axe de simetrie, cînd axa neutră coincide cu una din aceste axe, se poate măsura direct o anumită componentă a deformaţiei specifice, dacă amplasarea traductoarelor în secţiune şi racordarea lor în braţele punţii de măsură se face într-un mod corespunzător, folosind proprietatea punţii de a aduna algebric variaţiile rezistenţelor traductoarelor conectate într-un acelaşi braţ sau în braţe opuse şi de a scădea algebric variaţiile rezistenţelor conectate în braţe adiacente. Astfel dacă se notează cu q indicaţia punţii corespunzătoare unei variaţii ΔR a unei rezistenţe R racordată într-un braţ al punţii, rezultă că:

— la racordarea a 4 traductoare de rezistenţă R în braţele punţii (cîte unul de fiecare braţ), dezechilibrul punţii este nul, deci $q = 0$, dacă variaţiile ΔR ale celor patru traductoare sînt aceleaşi ca mărime şi semn; dezechilibrul devine de patru ori mai mare decît în cazul unui singur traductor activ (cînd $q = 1$) deci $q = 4$, dacă traductoarele din două

Scanned with OKEN Scanner

braţe opuse au variaţii ΔR de un semn, iar traductoarele din celelalte două braţe opuse au variaţii ΔR de semn contrar cu primele;

— la racordarea a două traductoare în braţe adiacente, variaţiile ΔR egale ca mărime şi semn dau $q = 0$, iar variaţiile ΔR egale ca mărime dar de semn contrar dau $q = 2$;

— la racordarea mai multor traductoare în acelaşi braţ, variaţiile ΔR se adună algebric.

Folosind aceste proprietăţi ale punţii şi cu o amplasare raţională a traductoarelor în secţiune se poate obţine cu uşurinţă componenta dorită a deformaţiei specifice produsă în cazul unei solicitări complexe.

Diferite scheme de amplasare şi racordare a traductoarelor în braţele punţii pentru obţinerea unei anumite componente a deformaţiei specifice respectiv a solicitării care a produs-o, sînt date în tabelul 3.15. În acest tabel sînt date şi relaţiile de calcul ale deformaţiei specifice ε căutate, funcţie de valoarea ε_{cit} dată de punte.

Notaţiile folosite în tabel reprezintă:

N — forţa normală;

M_i — momentul încovoietor;

M_z — momentul încovoietor dirijat după axa z;

M_y — momentul încovoietor dirijată după axa y;

M_t — momentul de răsucire;

ε_{cit} — deformaţia specifică citită la puntea de măsură sau stabilită pe baza indicaţiilor punţii înainte şi după încărcarea piesei;

ε_n — deformaţia specifică produsă de forţa axială N;

ε_a — deformaţia specifică aparentă produsă de variaţia de temperatură ΔT;

ε_i, ε_{iz}, ε_{iy} — deformaţia specifică produsă de momentul încovoietor M_i respectiv M_z şi M_y;

ε_t — deformaţia specifică maximă produsă de momentul de răsucire;
(toate deformaţiile specifice se măsoară după direcţiile principale);

μ — coeficientul lui Poisson.

Pentru a explica modul cum s-au obţinut relaţiile date în tabel se vor prezenta în detaliu două cazuri de solicitări compuse: întindere cu încovoiere, răsucire cu încovoiere şi solicitare axială.

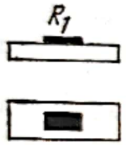
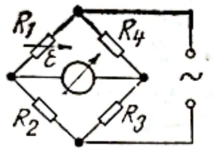
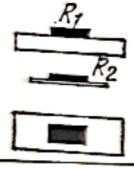
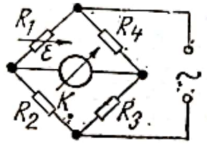
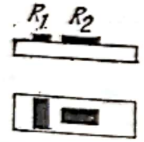
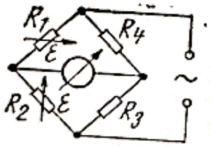
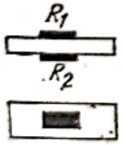
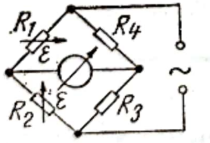
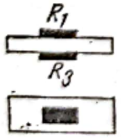
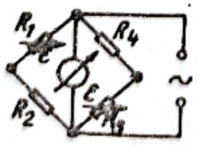
a) *Întindere cu încovoiere.* Pentru acest caz se pot utiliza fie două, fie patru traductoare active. Se va trata cazul utilizării a două traductoare active (poz. 4 şi 7 din tabel). Realizînd amplasarea şi racordarea acestor traductoare, indicată în tabelă, se separă fie deformaţia specifică datorită solicitării axiale N, fie cea datorită momentului încovoietor M.

Dacă se notează cu ε_0 deformaţia specifică produsă de solicitarea axială N (ε_0 reprezintă deformaţia în dreptul centrului de greutate al secţiunii) şi cu ε_i, deformaţia specifică produsă de momentul încovoietor

Scanned with OKEN Scanner

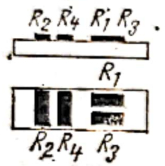
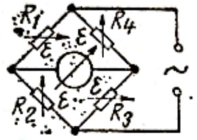
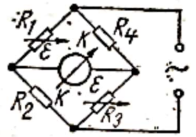
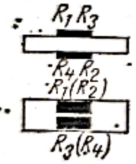
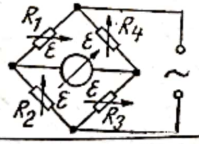
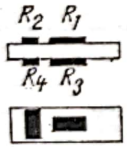
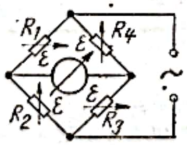
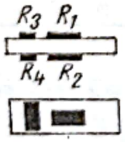
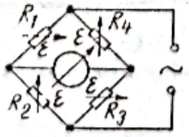
Scheme de amplasare pe piesă și de legare în brațele punții a traductoarelor pentru determinarea deformației specifice în cazul solicitărilor compuse la barele drepte

Tabelul 3.15

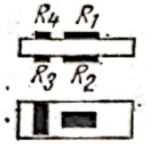
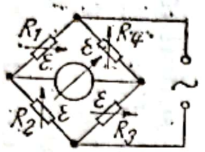
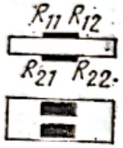
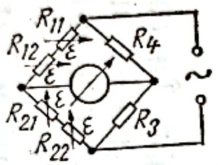
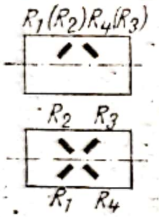
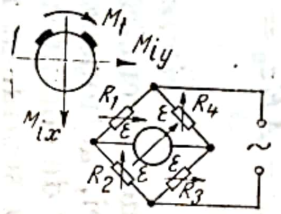
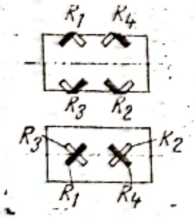
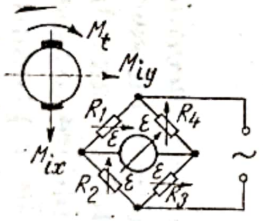
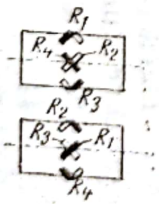
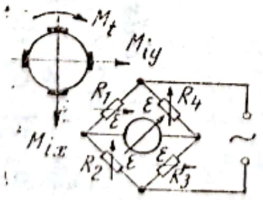
Cazul	Schema amplasării traductoarelor pe piesă	Schema legării traductoarelor în brațele punții	Factorul de sensibilitate q al montajului pentru solicitarea;				Componentele deformației specifice obținute
			termică, ΔT	N	M_i	M_t	
A. Solicitare compusă de întindere cu încovoiere							
1			1	1	1		$\varepsilon_n + \varepsilon_i = \varepsilon_{cit} - \varepsilon_a$
2			0	1	1		$\varepsilon_n + \varepsilon_i = \varepsilon_{cit}$
3			0	$1+\mu$	$1+\mu$		$\varepsilon_n + \varepsilon_i = \dfrac{\varepsilon_{cit}}{1+\mu}$
4			0	0	2		$\varepsilon_i = \dfrac{1}{2}\varepsilon_{cit}$
5			2	2	0		$\varepsilon_n = \dfrac{1}{2}\varepsilon_{cit} - \varepsilon_a$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.15 (continuare)

Cazul	Schema amplasării traductoarelor pe piesă	Schema legării traductoarelor în brațele punții	Factorul de sensibilitate q al montajului pentru solicitarea:				Componentele deformației specifice obținute
			termică, ΔT	N	M_i	M_t	
6			0	$2(1+\mu)$	$2(1+\mu)$		$\varepsilon_n + \varepsilon_i = \frac{1}{2(1+\mu)} \varepsilon_{cit}$
7			0	2	0		$\varepsilon_n = \frac{1}{2} \varepsilon_{cit}$
8			0	0	4		$\varepsilon_i = \frac{1}{4} \varepsilon_{cit}$
9			0	$2(1+\mu)$	0		$\varepsilon_n = \frac{1}{2(1+\mu)} \varepsilon_{cit}$
10			0	0	$2(1-\mu)$		$\varepsilon_i = \frac{1}{2(1-\mu)} \varepsilon_{cit}$

Scanned with OKEN Scanner

11			0	0	$2(1+\mu)$		$\varepsilon_t = \frac{1}{2(1+\mu)}\varepsilon_{cit}$
12			0	0	2		$\varepsilon_t = \frac{1}{2}\varepsilon_{cit}$
	B. Solicitare compusă de întindere cu încovoiere și răsucire						
13			0	0	0	4	$\varepsilon_t = \frac{1}{4}\varepsilon_{cit}$
14			0	0	0	4	$\varepsilon_t = \frac{1}{4}\varepsilon_{cit}$
15			0	0	0	4	$\varepsilon_t = \frac{1}{4}\varepsilon_{cit}$

Scanned with OKEN Scanner

în punctul 1, în cazul cînd traductoarele R_1 şi R_2 au aceeaşi rezistenţă R şi aceeaşi constantă k, se poate scrie :

$$\Delta R_1 = kR(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)$$

$$\Delta R_2 = kR(\varepsilon_0 - \varepsilon_i)$$

Prin plasarea traductoarelor în braţe adiacente (poz. 4 din tabel), puntea va măsura o variaţie de rezistenţă

$$\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2 = 2kR\varepsilon_i$$

respectiv, dacă potenţiometrul punţii a fost fixat la valoarea constantei k a traductoarelor, se va citi o deformaţie specifică

$$\varepsilon_{cit} = \frac{\Delta R}{kR} = 2\varepsilon_i$$

deci

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_{cit}}{2}$$

Prin plasarea traductoarelor în braţe opuse (poz. 7 din tabelul 3.15) puntea va măsura o variaţie de rezistenţă

$$\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2 = 2kR\varepsilon_0$$

respectiv va indica o deformaţie $\varepsilon_{cit} = \frac{\Delta R}{kR} = 2\varepsilon_0$ de unde $\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{cit}}{2}$

$$N = A\sigma_0 = AE\varepsilon_0 = \frac{AE}{2}\varepsilon_{cit}$$

b) *Răsucire cu încovoiere şi solicitare axială.* În cazul solicitării la răsucire a unei bare cu secţiunea circulară, se ştie că, după direcţiile ce fac unghi de 45° cu axa barei, acţionează tensiunile normale principale σ_1 şi σ_2 de întindere respectiv de compresiune, egale ca valoare cu tensiunile tangenţiale τ produse în secţiunea normală a barei de momentul de răsucire. Acestor tensiuni σ_1 şi σ_2 le corespund deformaţiile specifice principale ε_1 şi ε_2 egale ca valoare dar de semn contrar. Determinînd aceste deformaţii specifice, respectiv tensiunile σ_1 şi σ_2 se stabileşte valoarea tensiunii tangenţiale ştiind că $\tau = \sigma_1 = -\sigma_2$.

Dacă bara este solicitată numai la răsucire, este suficient să se plaseze două traductoare perpendiculare între ele şi orientate după direcţii ce fac 45° cu axa barei.

În cazul cînd arborele este solicitat şi la încovoiere şi întindere, pentru determinarea deformaţiei specifice corespunzătoare răsucirii şi eliminarea celor datorite încovoierii şi solicitării axiale, trebuie aplicate patru traductoare tensometrice. Axele celor patru traductoare trebuie orientate sub un unghi de 45° faţă de generatoarea barei, două cîte două fiind diametral opuse şi perpendiculare între ele. Dacă este posibil, se vor plasa

Scanned with OKEN Scanner

toate traductoarele cu centrele pe aceleași cerc (în aceeași secțiune); dacă însă acest lucru nu este posibil, diametrul barei fiind prea mic, se vor plasa cîte două traductoare în două secțiuni alăturate (ca în figura de la poz. 14 din tabel).

Notînd cu ε_n, ε_i, ε_t deformațiile specifice datorite forței axiale N, momentului încovoietor M_i, respectiv momentului de torsiune M_t, notînd traductoarele ca în figură, și dacă acestea au aceeași rezistență R și constanta k, se poate scrie:

$$\Delta R_1 = kR(\varepsilon_{n_1} + \varepsilon_{i_1} + \varepsilon_{t_1})$$

$$\Delta R_2 = kR(\varepsilon_{n_2} + \varepsilon_{i_2} + \varepsilon_{t_2}) = kR(\varepsilon_{n_1} + \varepsilon_{i_1} - \varepsilon_{t_1})$$

$$\Delta R_3 = kR(\varepsilon_{n_3} + \varepsilon_{i_3} + \varepsilon_{t_3}) = kR(\varepsilon_{n_1} - \varepsilon_{i_1} + \varepsilon_{t_1})$$

$$\Delta R_4 = kR(\varepsilon_{n_4} + \varepsilon_{i_4} + \varepsilon_{t_4}) = kR(\varepsilon_{n_1} - \varepsilon_{i_1} - \varepsilon_{t_1})$$

În aceste expresii s-au folosit relațiile:

$\varepsilon_{i_3} = -\varepsilon_{i_1}$, $\varepsilon_{i_2} = -\varepsilon_{i_4}$ — deoarece traductoarele R_1 și R_3 respectiv R_2 și R_4 sînt diametral opuse;

$\varepsilon_{t_1} = \varepsilon_{t_3} = -\varepsilon_{t_2} = -\varepsilon_{t_4}$ — deoarece traductoarele R_1 și R_3 au același unghi de înclinare față de axa piesei, iar traductoarele R_2 și R_4 sînt perpendiculare pe primele.

Racordînd traductoarele R_1 și R_3 în două brațe opuse iar traductoarele R_2 și R_4 în celelalte două brațe opuse, puntea va măsura o variație de rezistență:

$$\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_2 - \Delta R_4 = 4kR\varepsilon_t$$

respectiv va indica o deformație

$$\varepsilon_{cit} = \frac{\Delta R}{kR} = 4\varepsilon_t$$

de unde

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_t = \frac{1}{4}\,\varepsilon_{cit} \qquad \text{respectiv}$$

$$\tau = \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) = \frac{E\varepsilon_1}{1+\mu} = \frac{E}{4(1+\mu)}\,\varepsilon_{cit}$$

3.8.5. DETERMINAREA SOLICITĂRILOR ÎN SECȚIUNILE BARELOR DREPTE

Stabilirea componentelor deformațiilor specifice respectiv a eforturilor corespunzătoare la barele drepte de secțiuni mai complicate se poate face prin calcul pornind de la valorile deformațiilor specifice determinate experimental în unul sau mai multe puncte ale secțiunii, în funcție de numărul solicitărilor.

Se prezintă mai jos cazurile frecvent întîlnite și calculele ce trebuie efectuate pentru obținerea eforturilor în secțiune.

Scanned with OKEN Scanner

Bară solicitată axial sau la încovoiere pură. În cazul barelor (cu secțiune: inelară, circulară, dreptunghiulară, profil I, U, L, T) solicitate numai axial sau numai la încovoiere pură, determinarea efortului din secțiune se poate face cu un singur traductor tensometric aplicat în direcția axei barei; dacă ε este deformația specifică dată de traductor se calculează tensiunea normală corespunzătoare, $\sigma = E\varepsilon$ astfel că:

— în cazul solicitării axiale, tensiunea fiind uniform repartizată, se obține efortul axial cu formula

$$N = A\sigma$$

— în cazul solicitării la încovoiere pură, tensiunea avînd o variație liniară și cunoscînd distanța y de la axa neutră (axa z după care lucrează momentul încovoietor) pînă la traductor (de preferat ca această distanță să fie maximă), se obține valoarea momentului încovoietor cu formula

$$M_z = \frac{\sigma I_z}{y} = \frac{E\varepsilon I_z}{y} \tag{3.64}$$

și cu acesta se poate calcula apoi tensiunea maximă din secțiune.

Aceste cazuri simple de solicitare nu se pot realiza în practică, decît în condiții cu totul excepționale, astfel că măsurarea nu se va putea face niciodată cu un singur traductor în secțiune.

Stabilirea efortului axial sau a momentului încovoietor dintr-o bară de secțiune simplă solicitată complex. La barele de secțiune circulară, inelară, dreptunghiulară, profil I, L, T, determinarea efortului axial și a unei componente de moment încovoietor pe una din axele principale a secțiunii se poate face cu ajutorul a numai două traductoare, chiar atunci cînd solicitarea barei este mai complexă.

Pentru aceasta trebuie să se aplice cele două traductoare în două puncte din secțiune situate pe axa principală ce este perpendiculară pe axa după care lucrează componenta momentului încovoietor care trebuie determinată.

Notînd cu σ_1 și σ_2 tensiunile măsurate cu cele două traductoare, calculul efortului axial N și al momentului încovoietor M_z se face astfel:

a) *Pentru secțiunile simetrice față de axa neutră* (axa principală z după care lucrează componenta M_z ce trebuie determinată, fig. 3.90, a, b și c):

— tensiunea produsă de solicitarea axială și efortul axial:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}; \qquad N = A\sigma_0 \tag{3.65}$$

— tensiunea produsă de momentul încovoietor M_z și valoarea momentului:

$$\sigma_i = \pm\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \qquad M_z = \frac{\sigma_i I_z}{y_1} \tag{3.66}$$

Scanned with OKEN Scanner

b) *Pentru secțiunile nesimetrice față de axa neutră* (fig. 3.91):

— tensiunea în centrul de greutate și efortul axial:

$$\sigma_0 = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)\frac{e_1}{h}\ ; \qquad N = A\sigma_0 \tag{3.67}$$

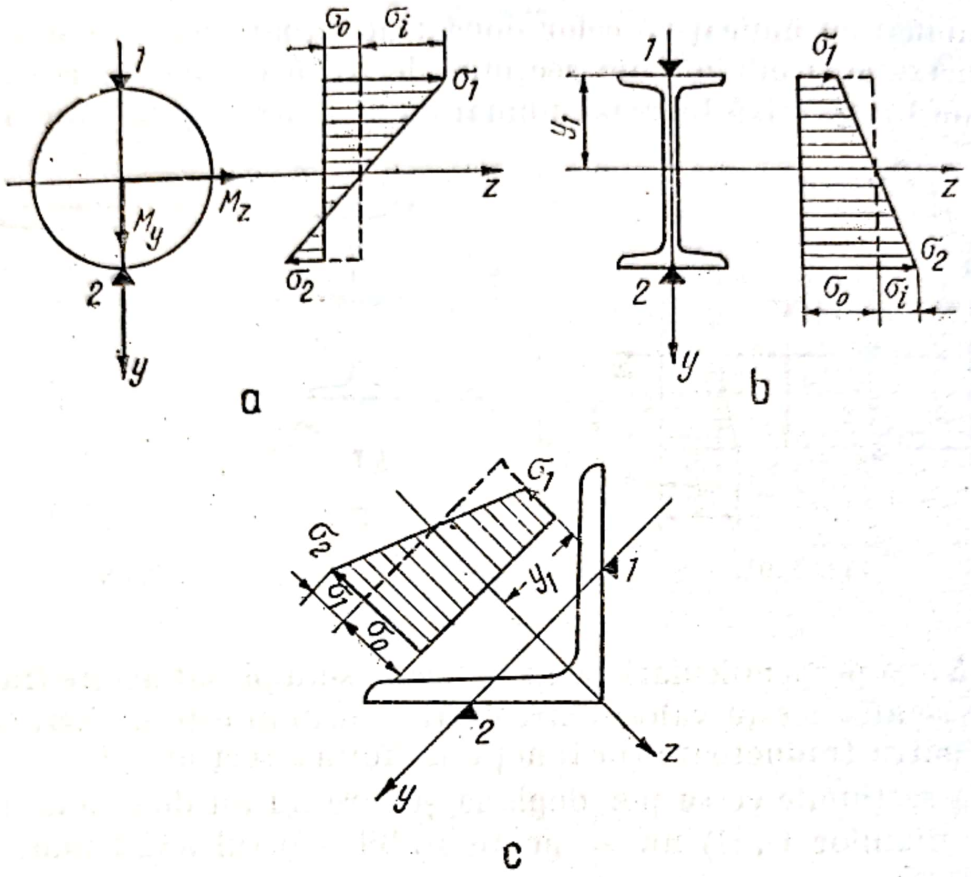


Fig. 3.90.

— tensiunea produsă de momentul încovoietor M_z și valoarea acestui moment:

$$\sigma_{i_1} = \sigma_1 - \sigma_0 \text{ și } \sigma_{i_2} = \sigma_2 - \sigma_0$$

$$M_z = \frac{\sigma_{i_1} I_z}{y_1} \text{ sau } M_z = \frac{\sigma_{i_2} I_z}{y_2} \tag{3.68}$$

Asupra acestui procedeu de determinare a tensiunii și a unui efort de încovoiere (sau numai a unuia din acestea), dintr-o bară solicitată complex, cu ajutorul a numai două traductoare sînt de făcut următoarele precizări:

— cele două puncte de măsură trebuie plasate neapărat pe axa principală a secțiunii perpendiculară pe axa neutră la distanțe cît mai mari de această axă (fig. 3.90, a, b, c și fig. 3.91);

— dacă cele două puncte în care se plasează traductoarele tensometrice sînt pe o axă principală ce taie numai inima secțiunii, fiind în același

timp simetrice față de centrul de greutate al secțiunii (ca în fig. 3.92, a și b), se poate afla cu ajutorul indicațiilor date de aceste traductoare efortul axial din acea secțiune. Nu se recomandă folosirea indicațiilor traductoarelor respective pentru determinarea momentului încovoietor deoarece, din cauza distanței mici dintre aceste traductoare pot interveni erori mari;

— numai cu indicațiile celor două traductoare nu se pot stabili tensiunile maxime și minime din secțiune decît, în cazurile particulare, cînd în secțiunea respectivă lucrează numai un efort axial și un efort de încovo-

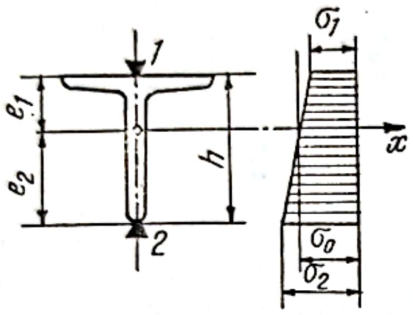


Fig. 3.91.

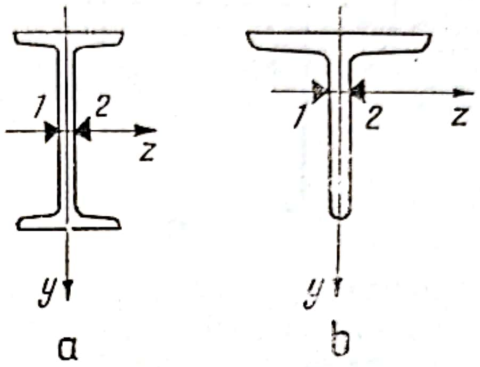


Fig. 3.92.

iere după axa perpendiculară pe axa pe care s-au plasat aceste traductoare; pentru a se afla aceste valori extreme ale tensiunii este necesar să se aplice trei sau patru traductoare (în funcție de forma secțiunii);

— la secțiunile ce se pot deplana și care nu au două axe de simetrie (cazul secțiunilor U, Π) nu se poate stabili efortul axial numai cu două traductoare;

— la secțiunile de formă T și I compuse din elemente cu legătură continuă, se procedează la fel ca și la secțiunile simple de aceeași formă.

Bare cu secțiuni ce nu se deplanează la solicitări complexe. În cazul barelor a căror secțiuni nu se deplanează chiar cînd sînt supuse la solicitări compuse (efort axial, efort de încovoiere și efort de răsucire) — cazul secțiunii circulare și a secțiunilor a căror linie mediană este compusă din două segmente de drèaptă ce se intersectează (secțiuni L, T) — este necesar să se plaseze cel puțin trei traductoare; de preferat ca aceste traductoare să fie plasate cît mai aproape de colțurile secțiunii.

Cu indicațiile acestor traductoare se vor putea afla atît eforturile ce lucrează în secțiune cît și valorile maxime ale tensiunilor.

Determinarea tensiunilor maxime și minime se poate face grafic (ca în fig. 3.93 a, b, c) sau analitic, știind că între două puncte din secțiune tensiunile variază liniar.

Eforturile din secțiune se pot determina de asemeni pe cale grafo-analitică (stabilind grafic componentele tensiunii) sau analitică.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă σ_1, σ_2, σ_3 sînt tensiunile măsurate în trei puncte *1*, *2*, *3* de coordonate (z_1, y_1), (z_2, y_2) și (z_3, y_3) se poate scrie :

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I_z} y_1 - \frac{M_y}{I_y} z_1 = \sigma_0 + m_z y_1 - m_y z_1$$

$$\sigma_2 = \sigma_0 + m_z y_2 - m_y z_2$$
$$\sigma_3 = \sigma_0 + m_z y_3 - m_y z_3$$

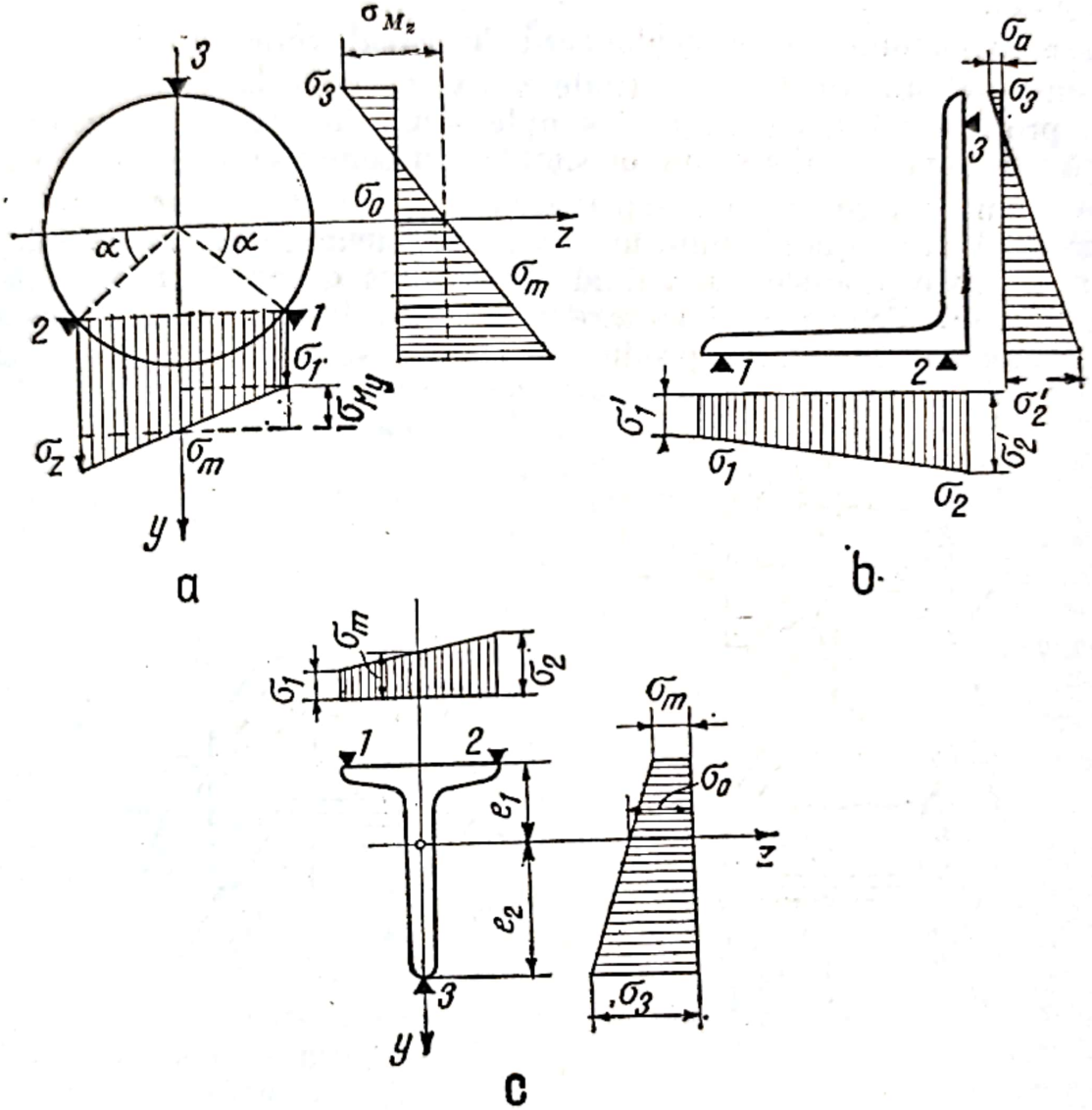


Fig. 3.93.

deci un sistem de trei ecuații cu trei necunoscute, din care rezultă :

$$m_z = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)(z_2 - z_3) - (\sigma_2 - \sigma_3)(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2)(z_2 - z_3) - (y_2 - y_3)(z_1 - z_2)}$$

$$m_y = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)(y_2 - y_3) - (\sigma_2 - \sigma_3)(y_1 - y_2)}{(y_1 - y_2)(z_2 - z_3) - (y_2 - (y_3 (z_1 - z_2)} \qquad (3.69)$$

$$\sigma_0 = \sigma_1 - m_z y_1 + m_y z_1$$

Scanned with OKEN Scanner

și deci eforturile în secțiune vor fi :

$$N = A\sigma_0\,; \quad M_z = m_z I_z\,; \quad M_y = m_y I_y. \tag{3.70}$$

Cu aceste eforturi se pot calcula apoi valorile tensiunilor în orice punct al secțiunii, respectiv valorile maxime și minime ale acestor tensiuni.

Calculele se simplifică dacă se plasează convenabil cele trei traductoare și anume, dacă e posibil, în puncte simetrice față de axele principale ale secțiunii.

Bare cu secțiuni ce se deplanează în cazul solicitărilor complexe. După cum se știe deplanarea tinde să se producă la barele cu pereți subțiri, profil deschis, cu secțiuni simple sau compuse din elemente cu legătură continuă (cazul secțiunilor simple sau compuse de profil I, U, Π).

De asemenea, se știe că deplanarea secțiunilor acestor bare tinde să se producă sub acțiunea unui moment de răsucire ; dacă această deplanare nu se poate produce liber, fiind împiedicată datorită prinderii barei la capete, apar solicitări suplimentare (momentul de încovoiere — răsucire M_ω și bimomentul B) care produc tensiunile suplimentare normale și

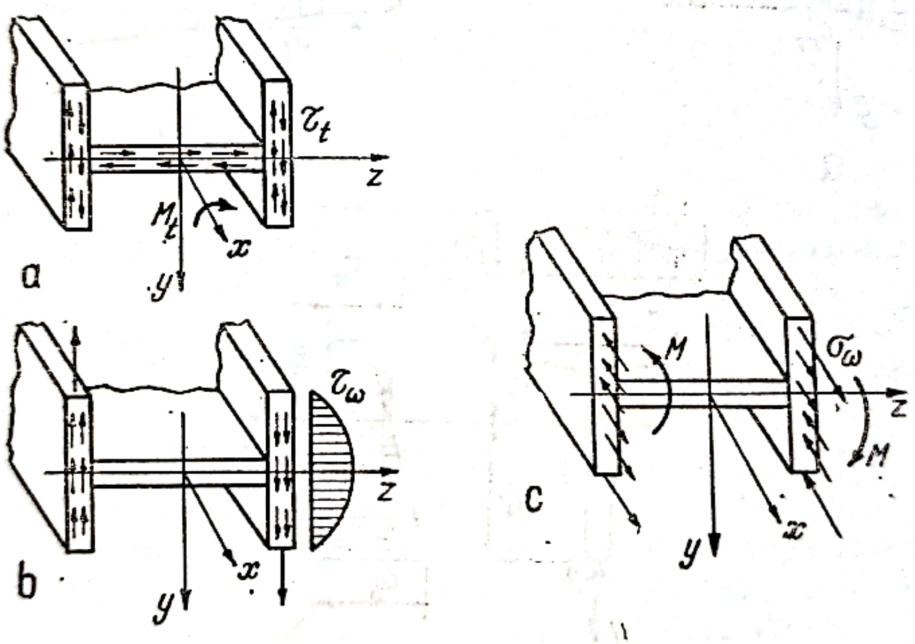


Fig. 3.94.

tangențiale σ_ω și τ_ω a căror distribuție, arătată în fig. 3.94, se poate deduce în baza unor ipoteze simplificatoare făcute de Vlasov. Tensiunile suplimentare se pot calcula cu formule asemănătoare celor de la încovoierea simplă :

$$\sigma_\omega = \frac{B}{I_\omega} \cdot \omega \tag{3.71 a}$$

$$\tau_\omega = \frac{M_\omega S_\omega}{\delta I_\omega} \tag{3.71 b}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care :

B este bimomentul de încovoiere-răsucire ;

ω — coordonata sectorială a punctului în care se calculează σ_ω ;

I_ω — momentul de inerţie sectorial al secţiunii barei ;

M_ω — momentul de încovoiere-răsucire ;

S_ω — momentul static sectorial al secţiunii ;

δ — grosimea elementului secţiunii.

Deoarece cu ajutorul traductoarele tensometrice nu se pot afla direct decît tensiunile normale, se va lua în considerare numai σ_ω.

Ţinînd seama şi de solicitarea datorită răsucirii împiedicate, tensiunea normală totală într-un punct al secţiunii va fi dată de formula :

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I_z} y - \frac{M_y}{I_y} z + \frac{B}{I_\omega} \omega \qquad (3.72)$$

deci sînt de stabilit pentru eforturi şi de aceea este necesar să se determine prin măsurări tensiunile normale în cel puţin patru puncte ale secţiunii astfel încît să se poată forma un sistem de patru ecuaţii prin rezolvarea căruia să se afle valorile N, M_z, M_y şi B.

În prealabil, pe lîngă centrul de greutate, axele principale şi momentele de inerţie faţă de aceste axe, trebuie să se afle şi mărimile sectoriale ale secţiunii : centrul de răsucire, punctele sectoriale nule, coordonatele sectoriale şi momentul de inerţie sectorial.

Deoarece, de cele mai multe ori nu interesează valoarea bimomentului B, ci numai valorile efortului axial N şi uneori ale momentelor încovoietoare M_z şi M_y, nu este necesar să se determine toate mărimile sectoriale ci numai coordonatele centrului de răsucire şi diagrama de variaţie a coordonatelor sectoriale ω, respectiv punctele sectoriale nule ; determinarea acestora este destul de simplă pentru secţiunile uzuale care au cel puţin o axă de simetrie şi formulele de calcul sînt date în orice curs de rezistenţa materialelor.

Cunoscînd distanţa a_y a centrului de răsucire şi punctele sectoriale nule, componentele

$$\sigma_0 = \frac{N}{A}, \quad \sigma_{M_z} = \frac{M_z}{I_z} y, \quad \sigma_{M_y} = \frac{M_y}{I_y} z \text{ şi } \sigma_\omega = \frac{B}{I_\omega} \omega$$

ale tensiunii normale dintr-un punct al secţiunii se pot determina uşor folosind o metodă grafo-analitică conform fig. 3.95 ; astfel cunoscînd tensiunile în patru puncte (1, 2, 3 şi 4) din secţiune (dispuse simetric, pentru simplificare, două cîte două faţă de axa de simetrie a secţiunii) se trasează diagramele de variaţie a tensiunii de-a lungul tălpii inferioare şi la partea superioară a secţiunii (se ştie că de-a lungul tuturor laturilor profilului secţiunii tensiunile normale au o variaţie liniară) şi se iau valorile tensiunii în dreptul axei y :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \text{ — la partea superioară}$$

$$\sigma_b = \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{2} \text{ — la partea inferioară}$$

Scanned with OKEN Scanner

Aceşti termeni nu conţin componentele σ_{M_y} şi σ_ω care, după cum se ştie, sînt nule în axa y, ci numai componentele σ_0 şi σ_{M_z}, care se separă uşor, ducînd diagrama de variaţie în lungul axei y (diagrama din stînga secţiunii) şi determinînd în dreptul axei z (după care σ_{M_z} este nul) pe σ_0, deci :

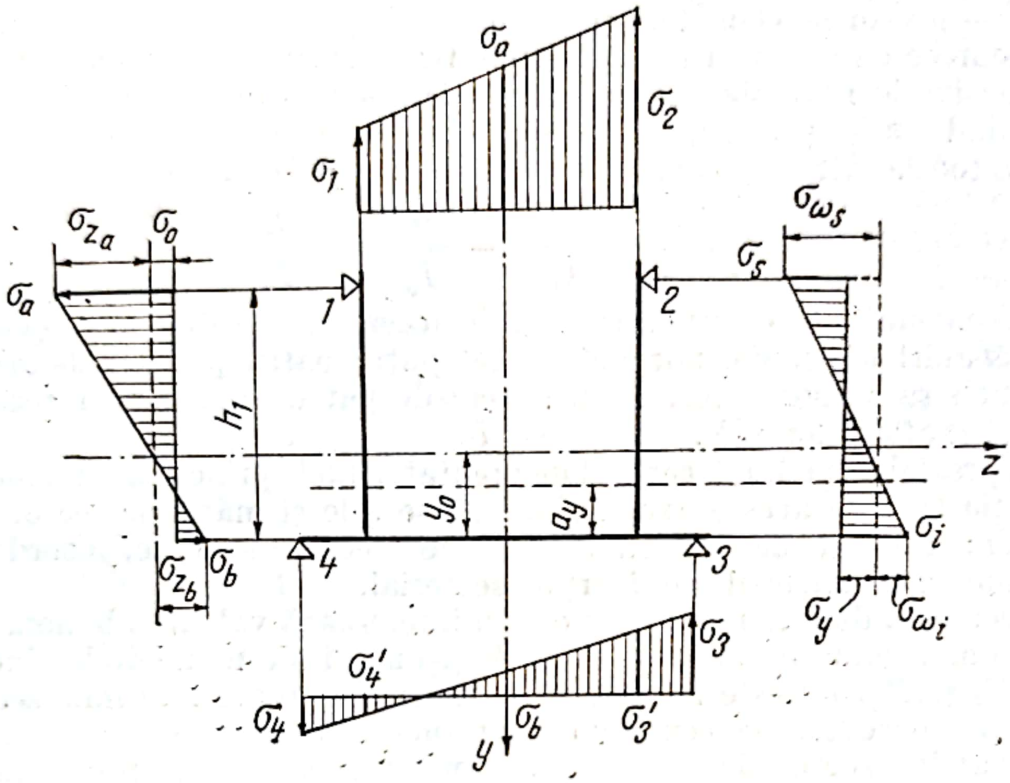


Fig. 3.95.

$$\sigma_0 = (\sigma_a - \sigma_b)\frac{y_0}{h_1} + \sigma_b \qquad (3.73)$$

(în care h_1 este distanţa de la talpa inferioară la punctul 1) şi apoi pe σ_{M_z} la partea superioară şi inferioară a secţiunii.

$$\sigma_{z_a} = \sigma_a - \sigma_0$$

$$\sigma_{z_b} = \sigma_b - \sigma_0$$

Celelalte componente σ_{M_y} şi σ_ω se determină cu ajutorul celei de-a patra diagrame din fig. 3.95 trasată în dreapta secţiunii în care :

$$\sigma_s = \pm\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2};$$

$$\sigma_i = \pm\frac{\sigma_4 - \sigma_3}{2}$$

Scanned with OKEN Scanner

și din care rezultă

$$\sigma_y = \pm\left[\sigma_s - (\sigma_s - \sigma_i)\frac{h_1 - a_y}{h_1}\right] \tag{3.74}$$

și

$$\pm\sigma_{\omega_s} = |\sigma_s| + |\sigma_y|$$

$$\pm\sigma_{\omega_i} = \pm|\sigma_i| - |\sigma_y| \tag{3.75}$$

Trebuie menționat că valorile maxime și minime ale tensiunii se pot afla direct, fără determinarea prealabilă a solicitărilor în secțiune, ducînd diagramele de variație de-a lungul fiecărei laturi, diagrame care fiind liniare sînt determinate prin valorile tensiunilor din două puncte.

Cum valorile extreme ale tensiunilor normale apar obișnuit în colțurile secțiunii se recomandă ca traductoarele să se plaseze cît mai aproape de aceste colțuri.

Numărul minim și poziția traductoarelor ce trebuie aplicate depinde de forma secțiunii; astfel:

— pentru secțiunile ce nu se deplanează (secțiunea circulară, inelară și secțiunile de forma T și L) se vor aplica cîte trei traductoare cît mai aproape de colțurile secțiunii, la secțiunile T și L, și la distanțe egale pe periferie, la secțiunile circulare și inelare; dacă la profilul T grosimea inimii este mică și nu permite plasarea unui traductor pe muchie, se vor aplica 4 traductoare (ca în fig. 3.96 a) în loc de trei;

— pentru secțiunile ce se deplanează, secțiuni simple sau secțiuni compuse cu legătura continuă a elementelor principale (secțiuni I, U, II) se vor aplica cîte patru traductoare cît mai aproape de colțurile secțiunilor și simetric așezate față de axa de simetrie a secțiunii; la secțiunile II, dacă grosimea inimilor este mică, se vor aplica cîte două traductoare pe fiecare inimă, astfel că în total vor fi 6 traductoare (fig. 3.96 b);

— pentru secțiunile compuse, cu legătură discontinuă (prin zăbreluțe) a elementelor principale, se vor aplica în secțiunea fiecărui element

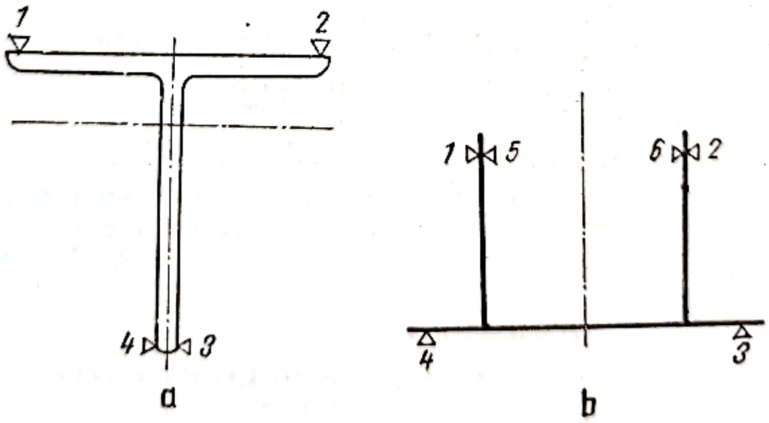


Fig. 3.96.

principal cîte trei sau patru traductoare (după forma secțiunii) și cîte 2 sau 3 traductoare pe fiecare zăbreluță din secțiunea respectivă.

Scanned with OKEN Scanner

Traductoarele trebuie aplicate riguros paralel cu axa barei și în aceeași secțiune transversală (excepție cazul barei cilindrice solicitată la torsiune, la care traductoarele sînt înclinate cu 45° față de axa barei).

În cazul profilurilor laminate se va căuta ca traductoarele din aceeași secțiune să fi plasate la distanță de colțurile secțiunii.

Bare cu secțiuni compuse din elemente legate prin zăbreluțe. La aceste bare solicitate complex, experiența a arătat că elementele componente nu lucrează totdeauna solidar și de aceea trebuie să se determine tensiunile separat pe fiecare element principal al barei.

În acest scop, pe fiecare element component, se vor aplica cîte cel puțin 3 sau 4 traductoare (în funcție de forma secțiunii) și cu valorile obținute prin măsurări se vor determina eforturile N, M_z și M_y:

— fie pentru fiecare element component al secțiunii folosind formulele arătate mai sus,

— fie pentru întreaga secțiune cu ajutorul relațiilor

$$N = \Sigma \sigma \Delta A$$
$$M_z = \Sigma \sigma y \Delta A \qquad (3.76)$$
$$M_y = \Sigma \sigma z \Delta A$$

calculele efectuîndu-se cu ajutorul diagramelor de variație ale tensiunilor trasate pentru fiecare element.

3.8.6. RECOMANDĂRI PENTRU PLASAREA RAȚIONALĂ A TRADUCTOARELOR ȘI PENTRU SISTEMATIZAREA CALCULELOR

Pentru a se putea stabili cît mai exact eforturile din barele solicitate complex și pentru sistematizarea calculelor se fac următoarele recomandări:

Secțiunile în care se plasează traductoarele tensometrice trebuie alese astfel încît distribuția tensiunilor să nu fie tulburată de prinderile de la capetele barei, de găurile de nit sau de alți concentratori de tensiune (racordări, crestături etc.).

Pentru sistematizarea calculelor, cu formulele date la § 3.8.5 se recomandă întocmirea de tabele corespunzătoare.

În cazul în care trebuie prelucrat un număr mai mare de date experimentale obținute pentru secțiuni de aceeași formă și de aceleași dimensiuni se recomandă ca traductoarele să fie plasate în aceleași poziții la toate secțiunile pentru ca, avînd aceleași elemente geometrice pentru toate secțiunile identice, să se poată stabili formule mai simple pentru calculul eforturilor din secțiune.

3.8.7. EXTRAGEREA ȘI INTERPRETAREA DATELOR DIN OSCILOGRAME

În cele ce urmează se arată modul de determinare a valorii ε din oscilogramele înregistrate la măsurările efectuate în regim dinamic considerînd cazurile cele mai frecvente întîlnite la încercări.

Scanned with OKEN Scanner

Oscilograma nu prezintă derivă de zero, spotul este fin (fig. 3.97). În acest caz valoarea ε_{max} se calculează ușor din fig. 3.97

$$\frac{\varepsilon_T}{d} = \frac{\varepsilon_{max}}{y}$$

Rezultă

$$\varepsilon_{max} = \frac{y}{d}\,\varepsilon_T \qquad (3.77)$$

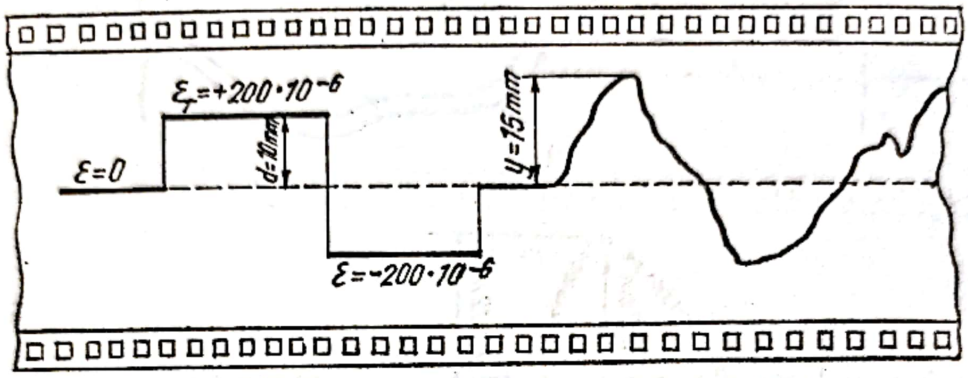


Fig. 3.97.

În exemplul dat : $\varepsilon_{max} = \frac{15}{10} \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 300 \cdot 10^{-6}$

Oscilograma nu prezintă derivă de zero, spotul este gros (fig. 3.98).

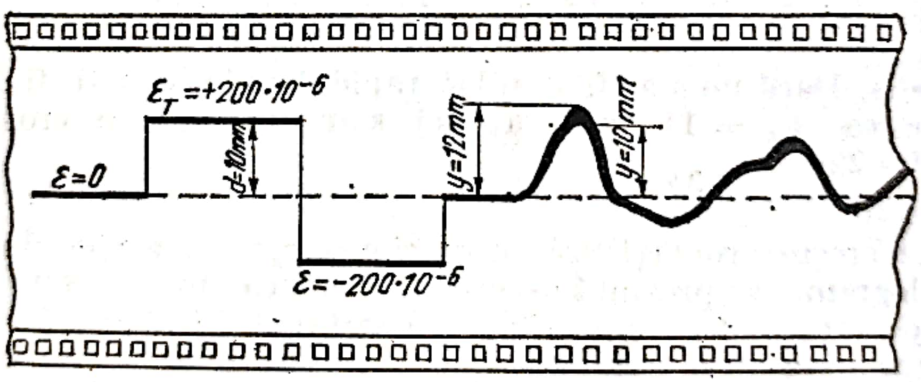


Fig. 3.98.

În această situație este *neapărat* necesară o derulare cu viteză mare a benzii pentru un timp foarte scurt. Se pot întîlni trei cazuri :

a) oscilograma se prezintă ca în fig. 3.99, a : spotul se menține la fel de gros.

În acest caz pentru determinarea amplitudinii se va folosi formula anterioară :

$$\varepsilon_{max} = \frac{y_m}{d}\,\varepsilon_T \text{ în care } y_m = \frac{y_1 + y_2}{2}.$$

Scanned with OKEN Scanner

În cazul de față ($y_1 = 10$ mm, $y_1 = 12$ mm)

$$y_m = \frac{10 + 12}{2} = 11 \text{ mm iar } \varepsilon = \frac{11}{10} \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 220 \cdot 10^{-6};$$

b) oscilograma se prezintă ca în fig. 3.99, b : spotul devine fin ; oscilograma este rezultatul suprapunerii a două sau mai multor oscilații de diferite frecvențe.

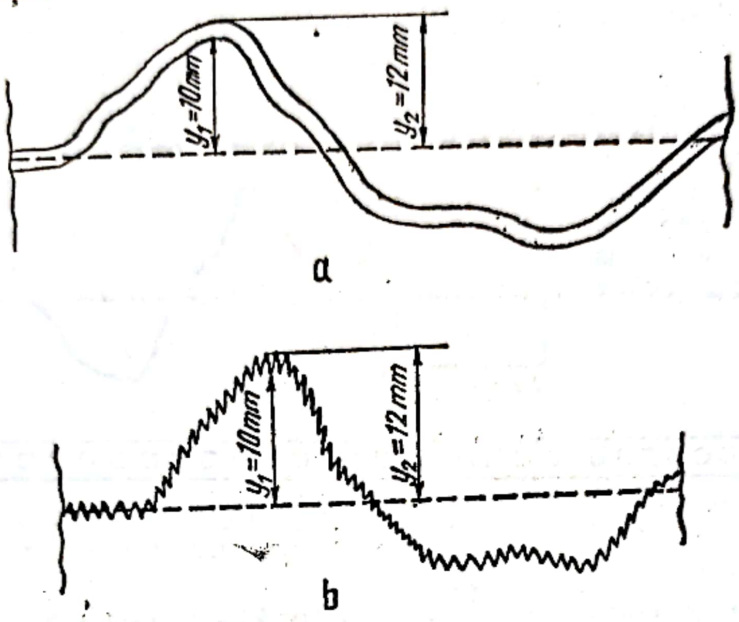


Fig. 3.99.

În acest caz se utilizează aceeași formulă luînd pentru y valoarea y_2.

În exemplul dat $\varepsilon_{max} = \frac{12}{10} \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 240 \cdot 10^{-6}$

Observație. Dacă nu s-ar fi derulat rapid banda și s-ar fi luat pentru y valoarea $y_m = 11$ mm, atunci s-ar fi comis o eroare $\Delta\varepsilon = 100 \cdot \frac{240-220}{240} = 8{,}3\,\%$

Eroarea crește proporțional cu grosimea $y_2 - y_1$ a spotului ;

c) oscilograma se prezintă asemănător cu cea din fig. 3.99 însă oscilația suprapusă are o frecvență riguros constantă de 50 Hz. În acest caz oscilația suprapusă nu se datorește unei solicitări dinamice a piesei măsurate ci este o oscilație perturbatoare indusă din rețeaua electrică. Deformația ε_{max} se va calcula ca în cazul a (luînd pentru y valoarea y_m). În caz contrar (dacă s-ar lucra ca în cazul b), în exemplul dat se introduce o eroare de +8,3 %, eroarea mărindu-se proporțional cu grosimea spotului.

Oscilograma prezintă derivă de zero. În cazul că spotul este fin (fig. 3.100) este necesar să se studieze cu atenție piesa încercată *după* efectuarea încercării. Se pot întîlni două cazuri :

a) piesa este ecruisată (rămîne cu deformație permanentă). În acest caz ε_{max} se calculează ca în situația din fig. 3.97 :

$$\varepsilon_{max} = \frac{y}{d} \varepsilon_T$$

Scanned with OKEN Scanner

Deformaţia specifică remanentă rezultă în mod analog

$$\varepsilon_0 = \frac{d_0}{d}\,\varepsilon_T .$$

Ea este cea care a provocat deriva de zero d_0.

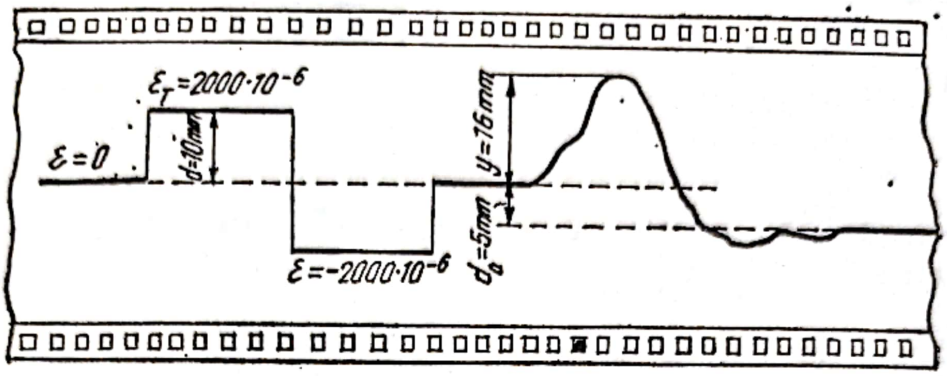


Fig. 3.100.

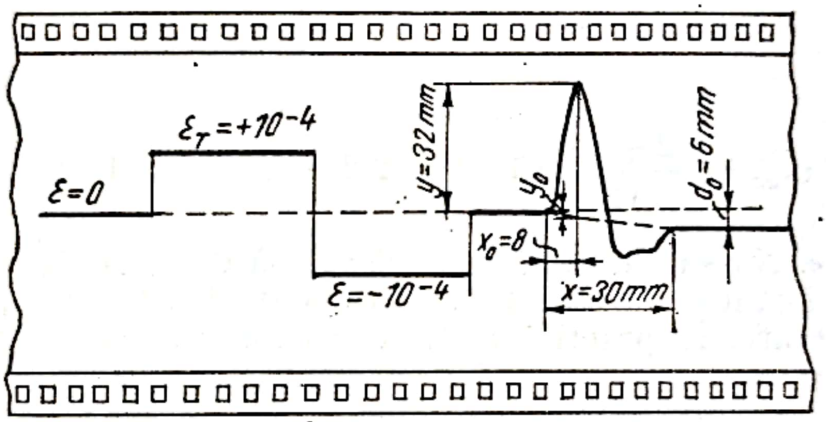


Fig. 3.101.

După efectuarea primei înregistrări amplitudinile se vor măsura luînd ca nivel de referinţă noua linie de zero sau, mai simplu, se va face o nouă echilibrare, compensîndu-se astfel deriva de zero.

În exemplul de faţă:

$$\varepsilon_{max} = \frac{16}{10} \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 3200 \cdot 10^{-6}$$

iar deformaţia specifică remanentă

$$\varepsilon_0 = \frac{5}{10} \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 1\,000 \cdot 10^{-6};$$

b) piesa nu este ecruisată (fig. 3.101).

Deriva de zero d_0, în acest caz, s-a datorat altor cauze decît a celor de natură mecanică (de exemplu: influenţa temperaturii, dereglării circuitelor prin variaţia rezistenţei de contact, variaţiei rezistenţei de izolaţie etc...)

Scanned with OKEN Scanner

În acest caz se face ipoteza că *deriva de zero variază liniar în timp*. Se fixează punctele A (sfîrșitul primei tarări de zero) și B (începutul ultimei tarări de zero) și se măsoară proiecția x pe orizontală a lui AB.

Conform ipotezei se poate scrie relația

$$\frac{d_0}{x} = \frac{y_0}{x_0}$$

rezultînd

$$y_0 = \frac{x_0}{x} \cdot d_0$$

Amplitudinea se calculează cu relația (3.77) în care y se substituie cu $y + y_0$:

$$\varepsilon_{max} = \frac{y + y_0}{d} \varepsilon_T$$

În cazul de față:

$$y_0 = \frac{8}{30} \cdot 6 = 1{,}6 \text{ mm}$$

iar

$$\varepsilon_{max} = \frac{32 + 1{,}6}{15} \cdot 10^{-4} = 2{,}24 \cdot 10^{-4} = 224 \cdot 10^{-6}$$

Observație. Nu s-a *măsurat* pe oscilogramă distanța y_0 ci x; distanța y_0 a fost *calculată* deoarece $y_0 \ll x$. Dacă s-ar fi măsurat y_0 s-ar fi comis *inevitabil* o eroare. În practică y_0 trebuie exprimat cu o aproximație de 10^{-3} mm, ceea ce nu s-ar putea face prin măsurare cu rigla.

În cazul că spotul este gros se va ține seama de cele arătate anterior (fig. 3.99).

3.9. EXEMPLE DE MĂSURĂRI TENSOELECTRICE

3.9.1. ÎNCERCĂRI DE REZISTENȚĂ ASUPRA VAGONULUI TRANSPORTOR CU 20 DE OSII AL C.F.R.

Vagonul cu 20 osii pentru transportat piese grele, fiind un vagon special, proiectat și realizat la noi în țară pentru prima dată, a fost supus, în vederea omologării, unei serii de verificări și probe, printre care și încercări pe stand însoțite de măsurări tensoelectrice.

Prin aceste măsurări s-a urmărit să se determine tensiunile efective care apar sub sarcinile normale de exploatare în elementele de rezistență și apoi să se compare valorile obținute cu cele avute în vedere la proiectare.

În acest scop au fost alese principalele elemente de rezistență ale vagonului și anume: lonjeroanele centrale, lonjeroanele de capăt, jugul-

Scanned with OKEN Scanner

cheson și cadrul unuia din cele 4 boghiuri. S-au stabilit secțiunile mai solicitate și numărul de traductoare care trebuiau aplicate în secțiunile respective pentru determinarea valorilor maxime ale tensiunilor.

Au fost aplicate în total 220 de traductoare tensometrice, dintre care : 57 pe lonjeroanele centrale, 48 pe lonjeroanele de capăt, 32 pe jugul-cheson și 83 pe cadrul unui boghiu (43 de traductoare pe lonjeroane și traverse, 32 la racordările ferestrelor cutiilor de osie și 8 pe două legături de gardă).

Amplasarea unor traductoare aplicate este arătată în figurile 3.102 și 3.103 pentru lonjeroane și figura 3.104 pentru jugul-cheson.

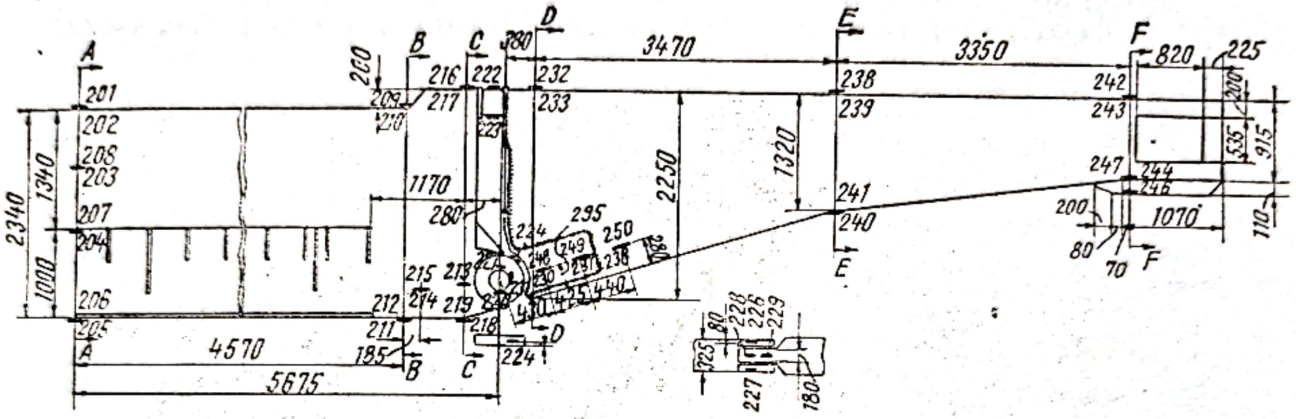


Fig. 3.102.

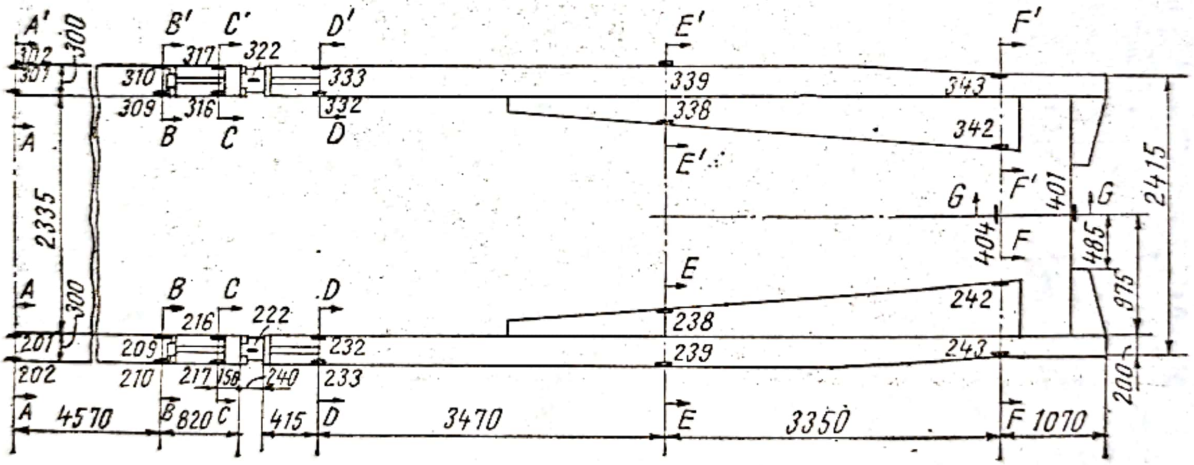


Fig. 3.103.

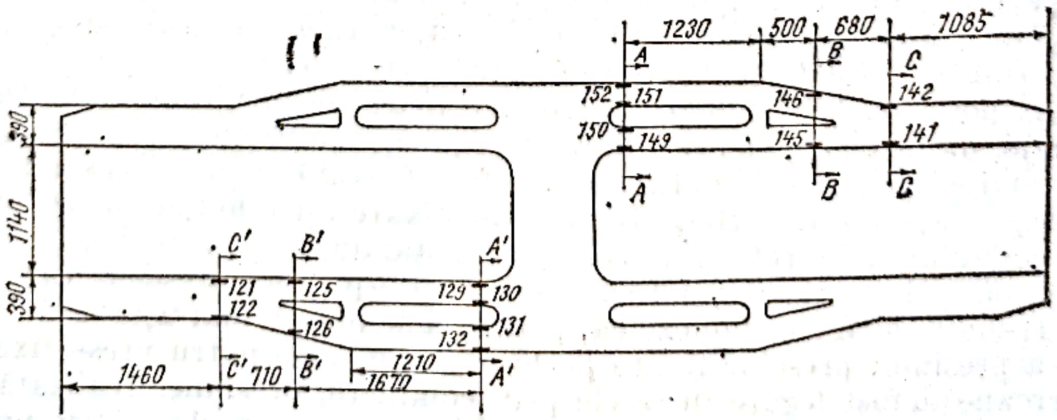


Fig. 3.104.

Au fost folosite traductoare cu baza de 20 mm, în afară de zonele de racordare unde au fost aplicate traductoare cu baza de 10 mm. Pentru lipirea traductoarelor pe piesele vagonului a fost utilizat adeziv Eastman 910 cu întărire rapidă, iar protejarea lor contra umidităţii cu chit AK22.

În figura 3.105 sînt arătate cîteva traductoare aplicate pe lonjeroanele centrale, împreună cu cablurile de legătură respective.

Încărcarea vagonului s-a realizat pe standul I.C.P.T.T., special construit pentru încercări de vagoane şi locomotive la sarcini verticale şi orizontale.

Sarcinile verticale de probă au fost aplicate pe lonjeroanele centrale, fiind realizate prin intermediul a opt prese hidraulice. Aceste prese, aşezate

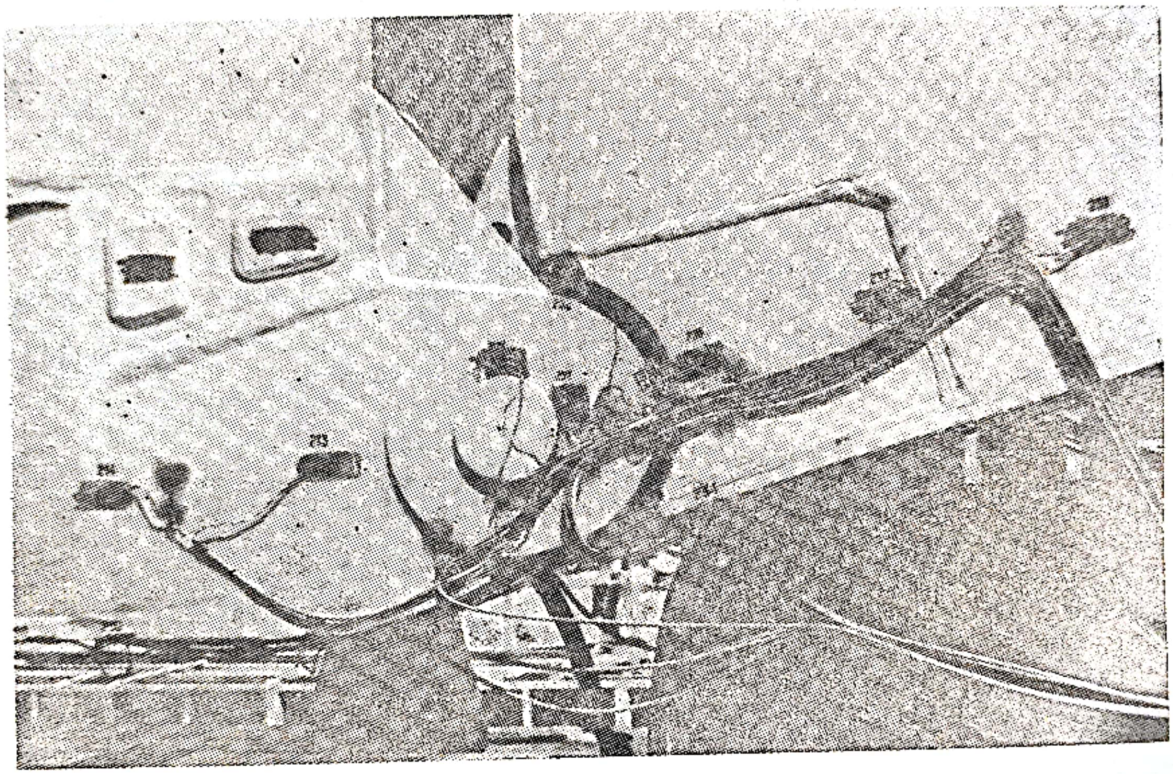


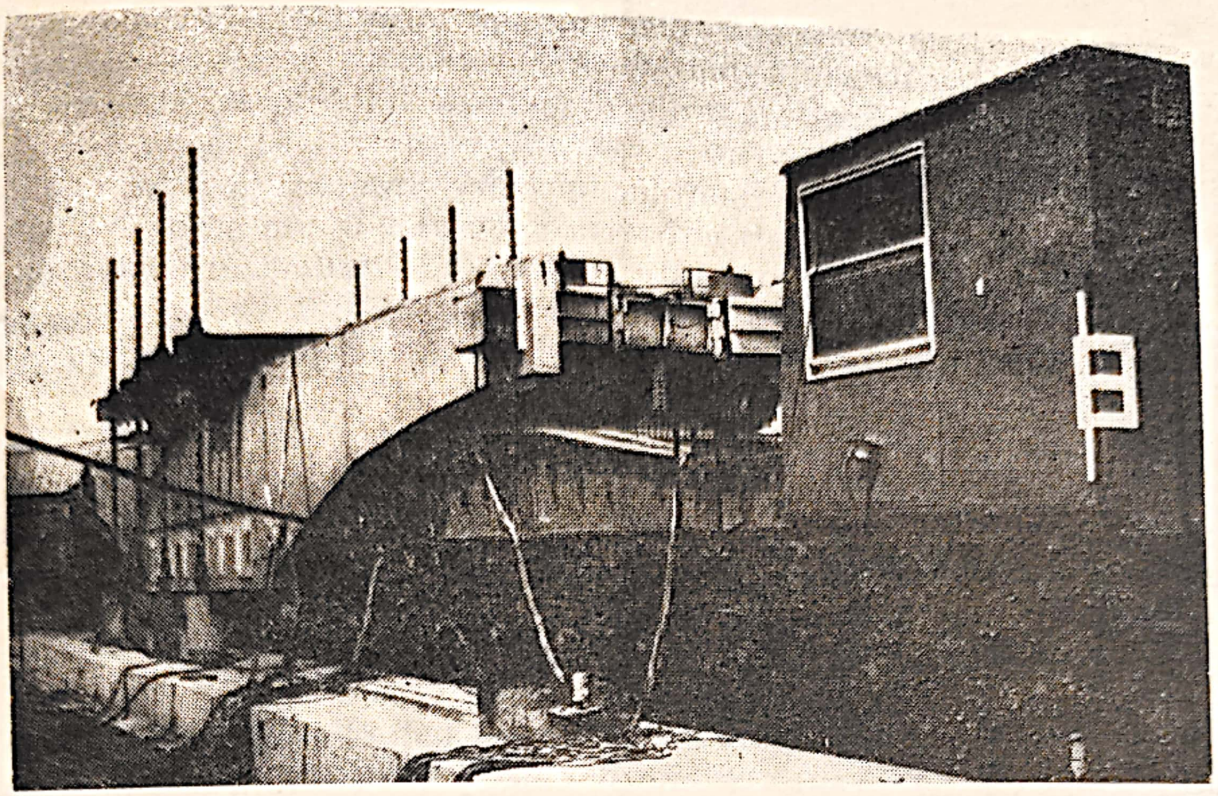
Fig. 3.105.

cîte patru pe fiecare lonjeron central, la distanţe egale, de 2800 mm, au fost fixate între tălpile superioare ale lonjeroanele centrale şi grinzile a patru cadre verticale transversale (fig. 3.106, a şi b).

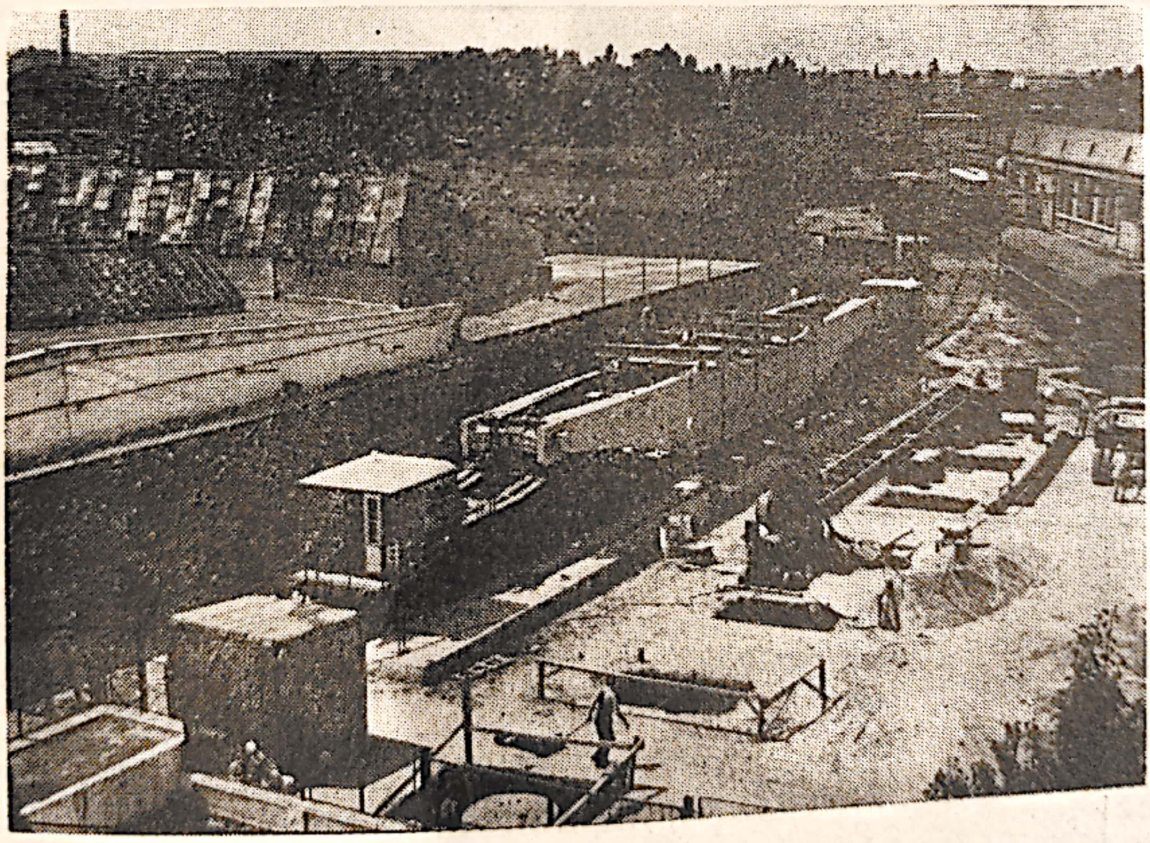
Avînd în vedere deplasarea relativ mare pe verticală a elementelor centrale, datorită elasticităţii arcurilor, pentru punerea în sarcină într-un timp mai scurt a acestor elemente, a fost folosită şi instalaţia hidraulică proprie a vagonului. Astfel, presele fiind fixate între lonjeroanele centrale ale vagonului şi cadrele transversale ale standului, s-au realizat sarcinile de probă prin ridicarea lonjeroanelor cu ajutorul preselor vagonului.

Trebuie să se menţioneze că, pentru a se obţine mai uşor o uniformizare a presiunii preselor fixate pe lonjeroane, cele patru prese fixate pe lonjeroane au fost legate între ele prin conducte, presiunea realizată fiind citită pe manometrele instalate pentru fiecare grup de patru prese şi

Scanned with OKEN Scanner



a



b

Fig. 3.106.

Scanned with OKEN Scanner

verificată cu ajutorul manometrelor montate în cabinele de comandă ale vagonului, pentru instalația hidraulică a acestuia.

S-au efectuat încărcări în trepte și anume la 1,4 MN ; 2,2 MN ; 2,8 MN și 3,1 MN.

Pentru măsurarea deformațiilor specifice produse de aceste sarcini s-a folosit următoarea aparatură tensometrică : o punte tensometrică Brüel & Kjaer cu cutii de comutare pentru 50 de traductoare, două punți Hottinger-Baldwin pentru 88 de traductoare și două punți Huggenberger cu cutiile de comutare respective pentru 82 de traductoare. O parte din aparatura folosită se vede în figura 3.107.

Pentru reducerea erorilor datorate variației de temperatură, măsurările s-au efectuat noaptea (între orele 22 și 3) cînd temperatura mediului ambiant are variații mai lente, astfel că intervalul de timp de circa 10 minute dintre două citiri la aparate, ea poate fi considerată practic constantă.

La fiecare treaptă de încercare s-au măsurat deformațiile specifice, atît la încărcare (aplicarea sarcinii) cît și la descărcare.

Pentru obținerea unor rezultate cît mai exacte la sarcina de 2,8 MN, care de fapt reprezintă încărcătura maximă pentru care a fost proiectat vagonul, operația de încărcare s-a repetat de patru ori, măsurîndu-se deci deformațiile specifice respective de opt ori.

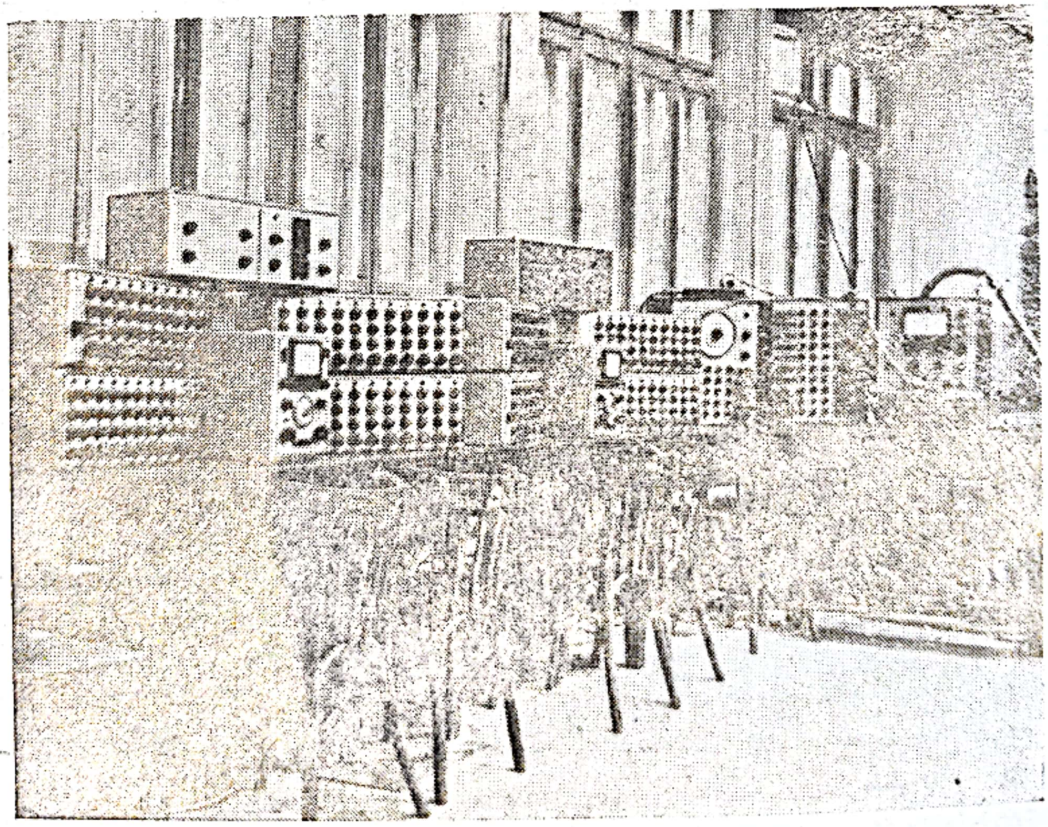


Fig. 3.107.

Scanned with OKEN Scanner

Cu valorile deformaţiilor specifice stabilite prin măsurare s-au calculat tensiunile respective, cu relaţia : $\sigma = E\varepsilon$, în care $E = 2{,}1 \times 10^6$ daN/cm². Din analiza rezultatelor obţinute a reieşit că tensiunile în punctele de măsurare şi tensiunile maxime din fiecare secţiune (determinate pe baza valorilor măsurate) au valori mai mici decît rezistenţele admisibile ale materialelor utilizate şi, în general, nu depăşesc valorile rezultate din calculele de proiectare.

Astfel, pentru sarcina de 3,1 MN aplicată pe lonjeroane au rezultat valori mai mari de 1000 daN/cm² în următoarele puncte de măsurare :

Nr. traductor	201	202	205	206	209	210	233
Tensiunea daN/cm²	−1134	−1315	1157	1152	−1210	−1367	−1157

301	302	305	206	309	316	317	332	333
−1245	−1365	1186	1483	−1418	−1279	−1344	−1155	−1163

În toate celelalte puncte de măsurare tensiunile au avut valori mai mici decît cele de mai sus şi în majoritate sub 1000 daN/cm².

Rezultatele obţinute au arătat că, în general, elementele de rezistenţă ale vagonului au fost dimensionate corespunzător.

3.9.2. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA VARIAŢIEI TENSIUNII TANGENŢIALE PE LUNGIMEA CUSĂTURII LATERALE A UNEI ÎMBINĂRI SUDATE PRIN SUPRAPUNERE

Pentru obţinerea unor date experimentale de comparaţie cu cele stabilite prin calculul privind variaţia tensiunilor tangenţiale în lungul cusăturii de sudură şi în funcţie de raportul dintre lungimea şi grosimea cusăturilor laterale, au fost efectuate în cadrul I.C.P.T.T. încercări, însoţite de măsurări tensoelectrice pe două tipuri de probe de îmbinări şi anume :

îmbinare cu două eclise schematizată şi îmbinarea prin suprapunere a două platbande.

Încercări pe îmbinarea cu două eclise schematizată. Încercările, însoţite de măsurări, au fost efectuate pe probe de tipul şi dimensiunile indicate în fig. 3.108.

Scanned with OKEN Scanner

Pe fiecare linie de îmbinare (corespunzătoare cusăturii de sudură) a probei de lungime maximă (lungimea unei cusături $l = 280$ mm) au fost aplicate traductoare tensometrice în cîte 10 puncte astfel:

— pe o linie de îmbinare au fost aplicate rozete tensometrice (numerotate în schiţa din fig. 3.108 de la 1 la 10);

— pe a doua linie au fost aplicate traductoare simple (numerotate de la 11 la 20) înclinate la 45° faţă de cusătură cu care s-a măsurat ε_{45};

— pe a treia linie au fost aplicate traductoare simple în lungul cusăturii (numerotate de la 21 la 30) cu care s-a măsurat ε_x;

— pe a patra linie s-au aplicat traductoare simple perpendiculare pe direcţia cusăturii (numerotate de la 31 la 40) cu care s-a măsurat ε_y.

Pentru control, pe faţa opusă, simetric cu traductoarele 21—30 au fost aplicate traductoarele simple 121—130. Proba pregătită pentru măsurări este arătată în figura 3.109.

Proba a fost supusă în maşina de încercat (fig. 3.110) la sarcina $P = 100$ kN şi $P = 150$ kN după fiecare încercare reducîndu-se lungimea cusăturilor schematizate cu cîte 60 mm, realizîndu-se astfel încercări

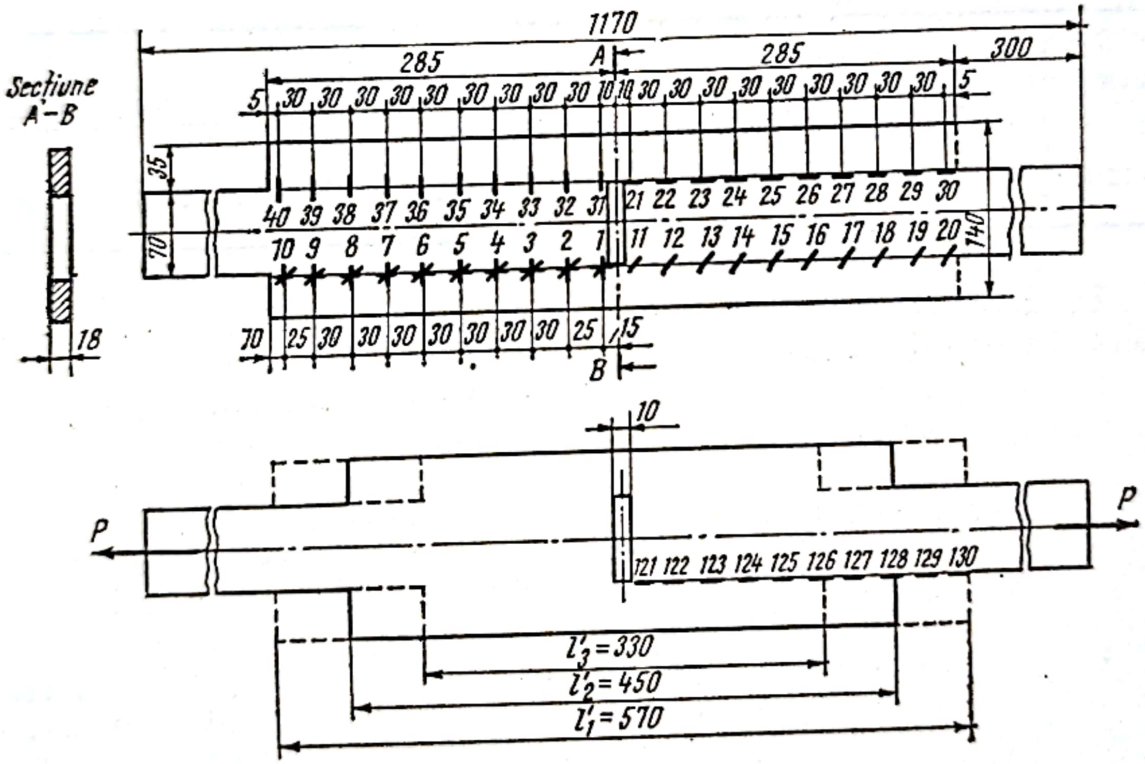


Fig. 3.108.

pe probe de trei lungimi diferite ($l_1 = 280$ mm, $l_2 = 220$ mm şi $l_3 = 160$ mm).

Cu valorile obţinute la măsurări, ţinînd seamă că în fiecare punct s-au măsurat deformaţii specifice pe cîte trei direcţii la 45°, au fost determinate direcţiile principale, tensiunile principale σ_1 şi σ_2, tensiunile normale σ_x şi σ_y în lungul cusăturii şi perpendicular pe direcţia acesteia,

Scanned with OKEN Scanner

tensiunea tangenţială τ_{xy}, folosind relaţiile (1.27), (1.28) date în capitolul 1 precum şi relaţia: $\tau_{xy} = G\,[2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_x - \varepsilon_y)]$.

Cu rezultatele obţinute la măsurări şi în urma calculelor efectuate au fost trasate în figura 3.111 curbele de variaţie, în lungul cusăturii, ale

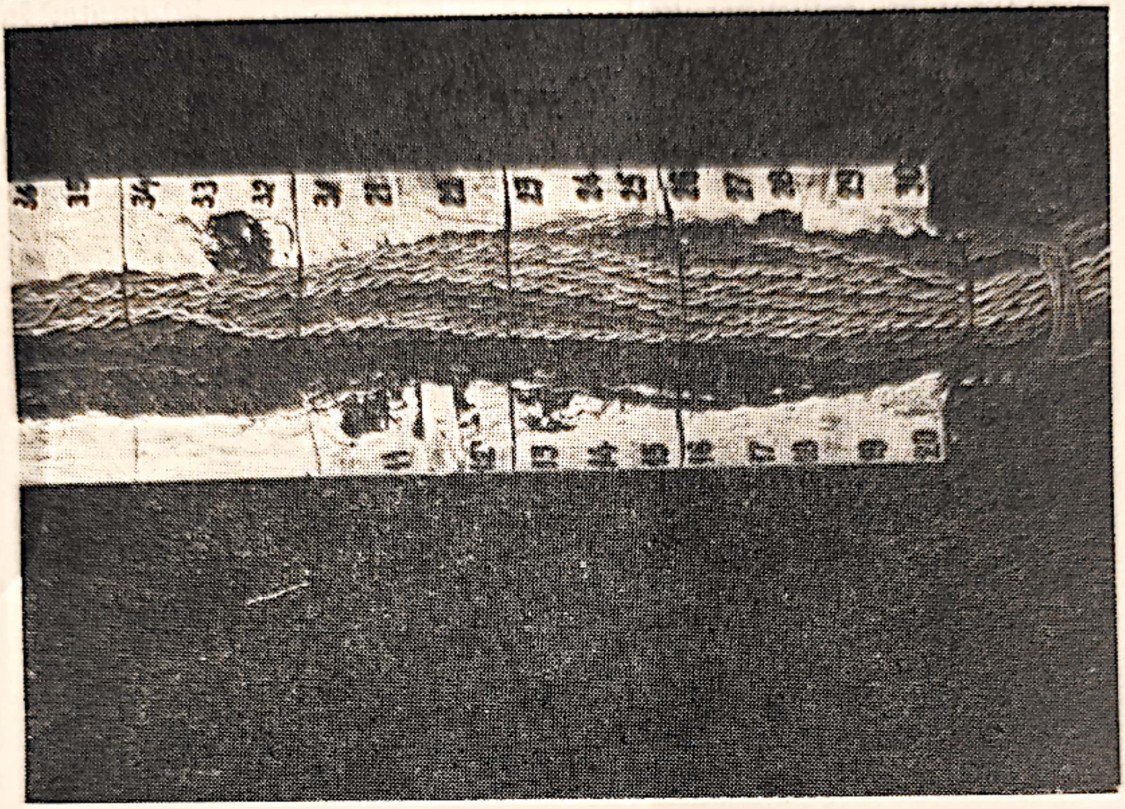


Fig. 3.109.

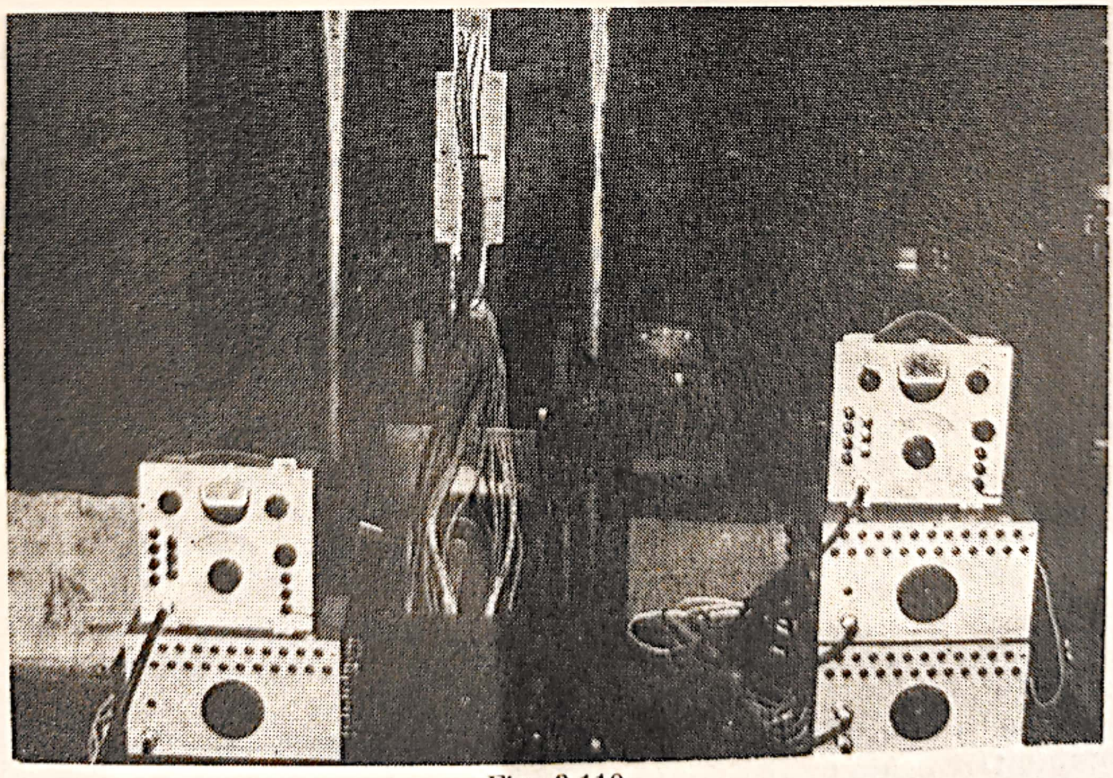


Fig. 3.110.

Scanned with OKEN Scanner

tensiunii tangențiale τ_x obținute pentru cele trei probe. Pentru comparație, în aceeași figură, au fost trasate cu linii întrerupte, și curbele de variație ale tensiunilor τ_x, determinate prin calcul. Se observă o foarte bună concordanță între rezultatele experimentale și cele ale calculului analitic.

Încercări pe îmbinări prin suprapunere a două platbande. În acest scop a fost pregătită o probă avînd forma și dimensiunile prezentate în

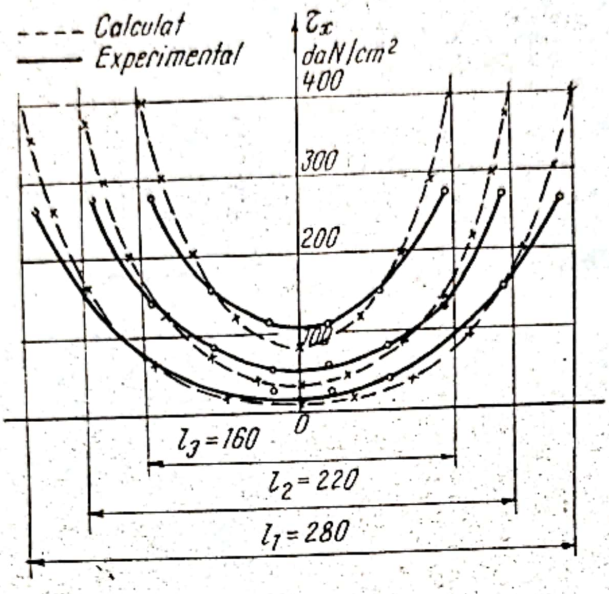


Fig. 3.111.

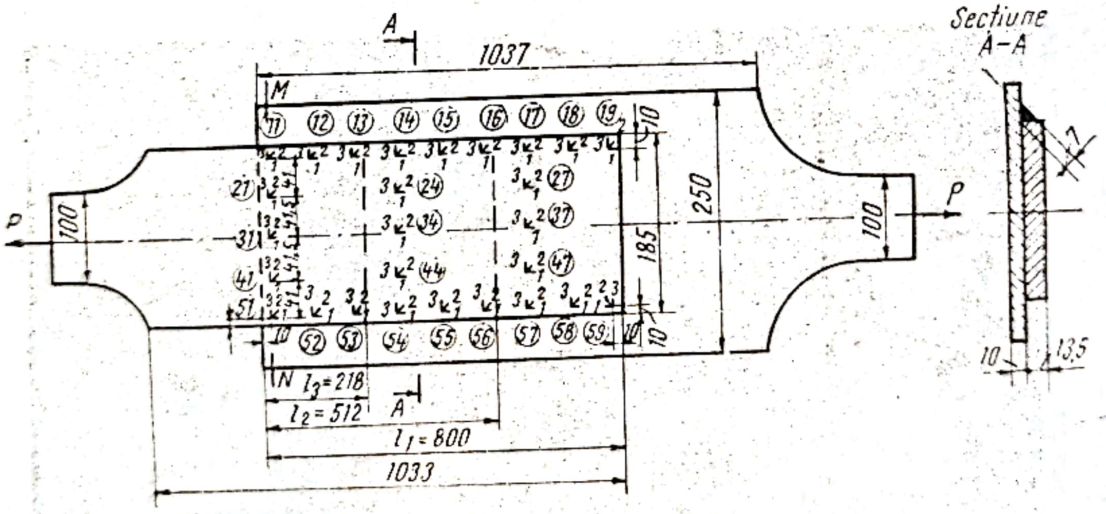


Fig. 3.112.

figura 3.112. Inițial cusătura de sudură a avut lungimea $l_1 = 800$ mm și ulterior prin două secționări succesive s-au obținut probe cu lungimile $l_2 = 512$ mm și $l_3 = 218$ mm.

Dimensiunile platbandelor au fost astfel alese încît secțiunile să fie aproximativ egale: $A_1 = 1{,}35 \times 18{,}5 = 24{,}98$ cm²; $A_2 = 1 \times 25 =$

Scanned with OKEN Scanner

$= 25$ cm^2. Au fost aplicate în total 27 de rozete tensometrice, plasîndu-se cîte 9 rozete de-a lungul cusăturilor de sudură și cîte trei rozete în plus în trei secțiuni transversale ale platbandei.

În figura 3.113 se arată proba după aplicarea rozetelor.

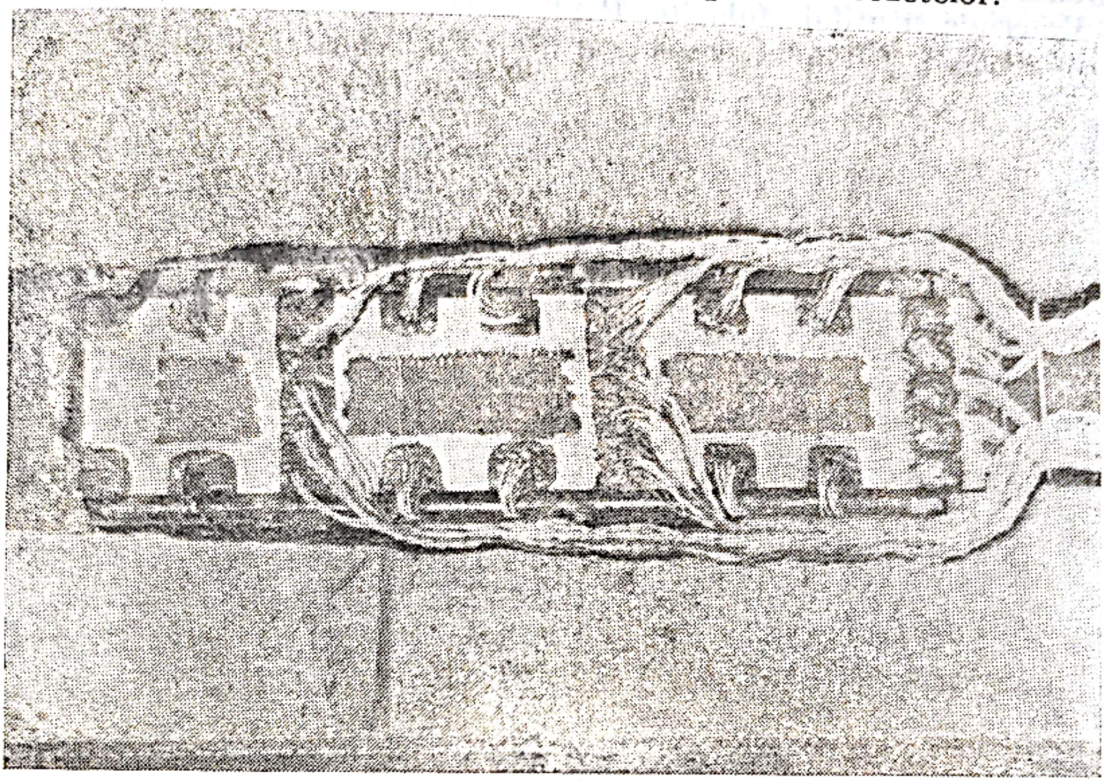


Fig. 3.113.

Sarcinile de încercare au fost $P_1 = 150$ kN și $P_2 = 200$ kN., pentru proba cu $l_1 = 800$ mm și $P_1 = 100$ kN și $P_2 = 150$ kN pentru probele cu lungimile $l_2 = 512$ mm și $l_3 = 218$ mm.

Cu rezultatele încercărilor sub sarcina $P = 150$ kN și ale calculelor efectuate pentru determinarea tensiunilor, au fost trasate curbele de variație ale tensiunilor tangențiale τ_x (fig. 3.114).

3.9.3. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TENSIUNILOR DIN DISCUL UNEI ROȚI DE VAGON

Pentru determinarea tensiunilor produse în discul unei roți de vagon în urma aplicării bandajului și presării osiei în butucul roții, au fost efectuate măsurări de deformații specifice cu ajutorul unor traductoare tensometrice rezistive. Pentru montare pe discul roții bandajul este încălzit pînă la cca. 290°C. După aplicarea bandajului „cald" pe discul „rece" al roții (aflat la temperatura încăperii), se produce un schimb de căldură între bandaj și disc, precum și între acestea și mediul ambiant, astfel că, pînă la stabilirea echilibrului termic, are loc un regim variabil, în timp și loc, regim care durează un timp destul de îndelungat (5—6 ore), din cauza maselor relativ mari de metal ce intervin în acest proces termic.

Scanned with OKEN Scanner

Temperaturile relativ ridicate ale bandajului şi discului roţii au impus folosirea unor traductoare tensometrice pentru temperaturi înalte, iar variaţiile mari de temperatură, precum şi timpul îndelungat în care acestea se produc, au condus la elaborarea unei metodologii de lucru speciale.

Materiale şi utilaje folosite. Pentru măsurarea deformaţiilor specifice din discul roţii şi bandaj, la aplicarea la cald a acestuia, au fost folosite

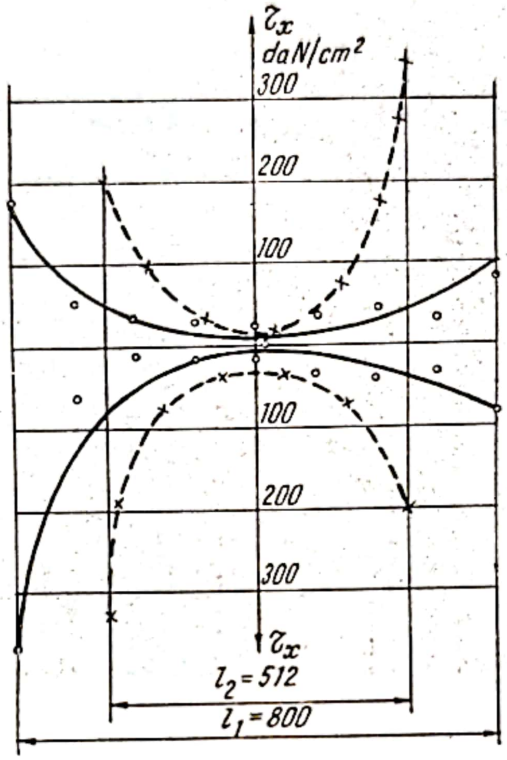


Fig. 3.114.

următoarele tipuri de traductoare rezistive, livrate de firma Hottinger-Baldwin :

— traductoare de temperaturi înalte, tip FNH 50 × 12, fără suport, care lipite cu adezivul ceramic AL—P1 şi legate la punte cu bandă de conexiuni din nicrom pot fi folosite pînă la temperatura de 600°C;

— traductoare de temperaturi înalte, tip FAH 50 ×12, fără suport, care lipite cu adezivul ceramic RX—1 şi legate la puntea de măsură cu bandă de conexiuni din advans (constantan) pot fi folosite pînă la temperatura de 320°C.

Avînd în vedere faptul că temperatura maximă din timpul încercării nu depăşea 320°C, cele două tipuri de traductoare de temperaturi înalte (FNH şi FAH) au fost lipite cu acelaş adeziv tip RX—1. Tehnologia de lipire cu acest adeziv care necesită un tratament termic destul de dificil şi îndelungat, este următoarea :

— se pregăteşte suprafaţa piesei în mod obişnuit (curăţire mecanică şi chimică) şi se aplică un strat subţire de adeziv, după care se încălzeşte lent piesa pînă la 40°C, temperatură care este menţinută timp de aproximativ 15 min ;

Scanned with OKEN Scanner

— se aplică peste stratul inițial un nou strat de adeziv, peste care se aplică rețeaua traductorului și, după ce s-a scos cu mare grijă suportul traductorului (astfel ca să nu fie deranjată rețeaua acestuia), se aplică un nou strat de adeziv;

— se încălzește lent piesa cu traductorul pînă la 65°C și se menține această temperatură timp de 30 min;

— se aplică un nou strat de adeziv, care servește și ca strat de protecție, după care se introduce piesa în cuptor, ridicîndu-se continuu temperatura cu 3—5°C/oră timp de 30—40 ore, pînă se ajunge la 180°C; valorile indicate pentru temperatura și timpul de întărire reprezintă valori minime; pentru întărirea finală, aceste valori pot fi mărite pînă se ajunge la temperatura maximă a adezivului, obținîndu-se astfel o mai mare stabilitate a traductorului în timpul măsurării.

Pentru realizarea acestui tratament termic necesar aplicării traductoarelor de temperatură înaltă pe disc și bandaj, precum și pentru determinarea funcției $\Phi(T)$ definită în § 3.4.1, relația (3.26), a fost proiectat și

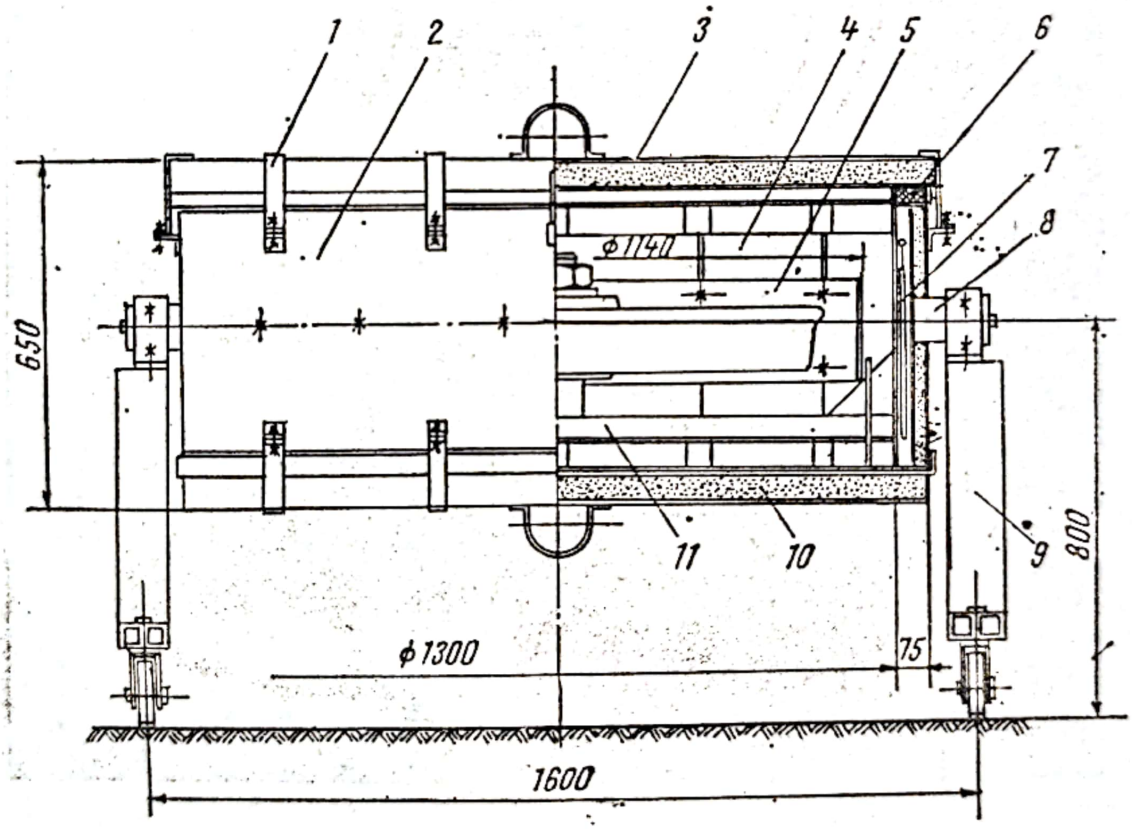


Fig. 3.115.

executat un cuptor electric (fig. 3.115) în care s-a putut obține regimul de temperatură dorit [7].

Temperaturile au fost măsurate cu ajutorul unor termoelemente din Cr-Co realizate în laboratorul de specialitate al Uzinelor Griviţa Roșie și etalonate pentru intervalul de temperatură în care s-a lucrat, cu o precizie de $\pm$ 2°C. Pentru citirea, respectiv înregistrarea temperaturilor,

Scanned with OKEN Scanner

au fost folosite înregistratoare potențiometre automate tip EPP09 de fabricație sovietică.

Determinarea funcției $\Phi(T)$. Din același material cu al discurilor de roți cercetate, au fost confecționate plăcuțe de 100 × 50 × 8 (mm) pe care au fost aplicate traductoare similare celor active (aplicate pe roți), cîte două traductoare corespunzător fiecărui tip, fiecărei valori a rezistenței, precum și fiecărei valori a constantei traductorului. La aplicarea traductoarelor s-a realizat tratamentul termic prezentat anterior cu ajutorul cuptorului electric menționat.

În continuare, pornind de la temperatura de 20°C, traductoarele au fost supuse unei variații lente de temperatură, măsurîndu-se la fiecare creștere a temperaturii cu 5°C valoarea deformației specifice aparente $\left(\frac{1}{k_0}\frac{\Delta R}{R_0}\right)$ care, în lipsa solicitării mecanice reprezintă, conform relației (3.26) chiar valoarea funcției $\Phi(T)$. În figura 3.116 se vede cuptorul, precum și o parte din aparatura folosită (punți tensometrice și potențio-

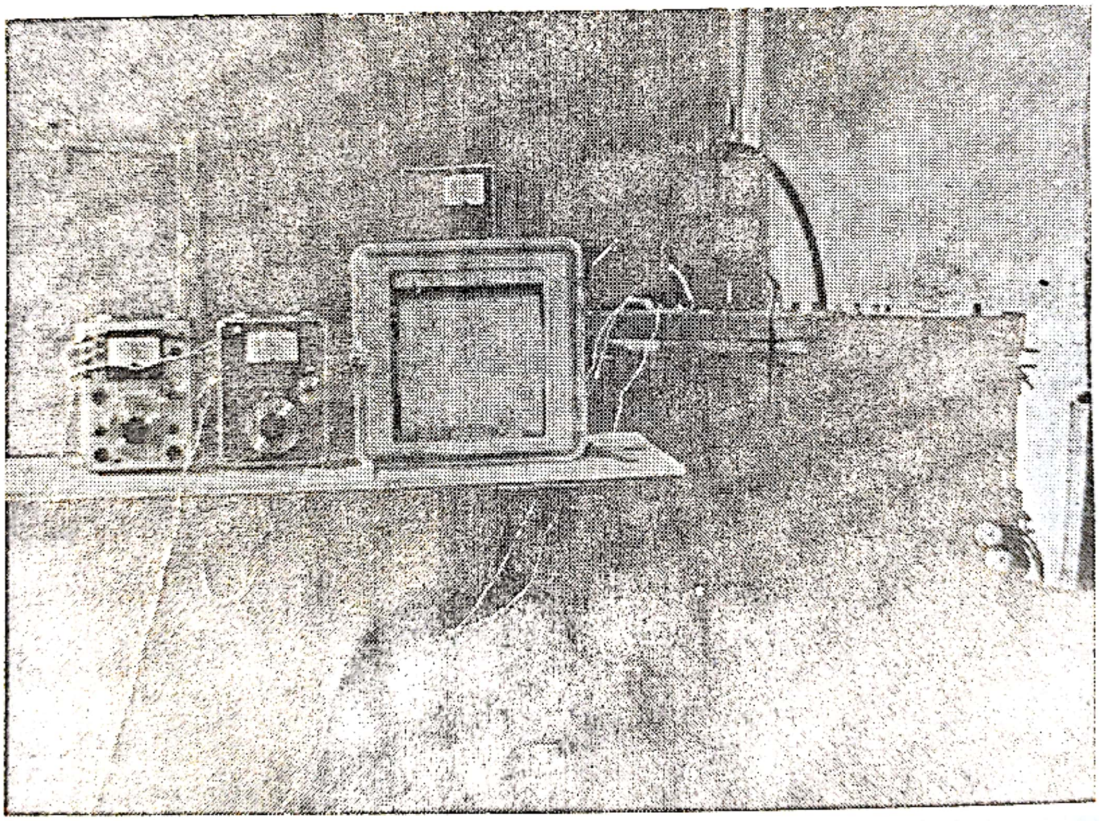


Fig. 3.116.

metrul pentru înregistrarea temperaturilor) la stabilirea influenței temperaturii asupra variației de rezistență electrică a traductoarelor.

Pentru fiecare din tipurile de traductoare folosite au fost efectuate 6 ... 8 determinări, obținîndu-se tot atîtea valori ale variației deformației specifice aparente, respectiv ale funcției $\Phi(T)$ pentru fiecare treaptă de temperatură.

Scanned with OKEN Scanner

Cu valorile medii ale funcției $\Phi(T)$ au fost trasate curbele de variație ale acesteia cu temperatura (fig. 3.117).

Pregătirea și efectuarea măsurărilor. Au fost pregătite pentru încercări două discuri de roți ; pe fiecare disc au fost aplicate cîte 78 traductoare,

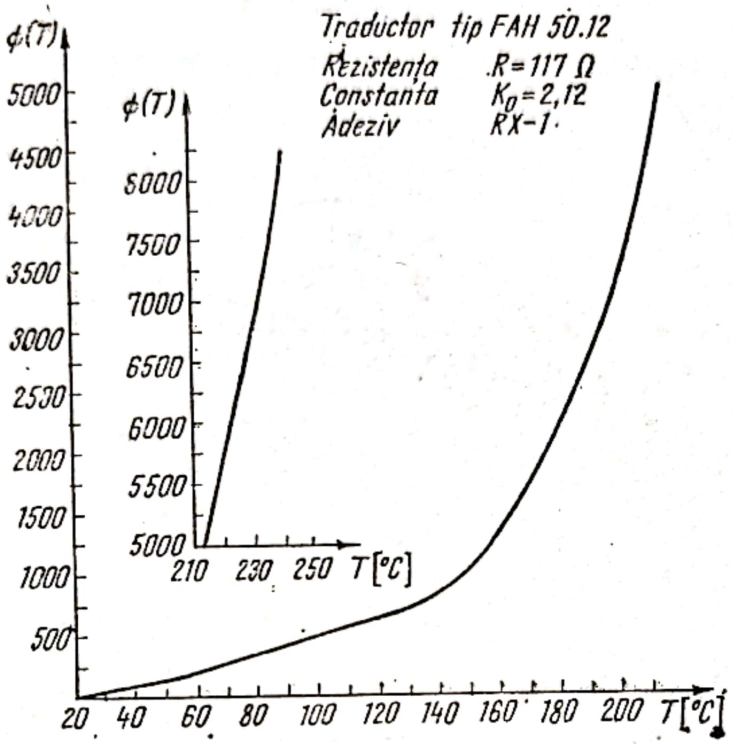


Fig. 3.117.

orientate după direcțiile principale (direcția radială și direcția tangențială), iar pe bandaj au fost aplicate 10 traductoare.

Au fost aplicate, de asemenea, pe fiecare disc, cîte 18 termocuple și pe fiecare bandaj cîte 2 termocuple.

Pozițiile termocuplelor precum și pozițiile și orientarea traductoarelor aplicate, sînt arătate în figura 3.118.

În figura 3.119 se arată discul după aplicarea și cablarea traductoarelor, respectiv după montarea termocuplelor.

În vederea asamblării lor, discurile și bandajele au fost prelucrate la dimensiuni încadrate în toleranțele prescrise, astfel ca să se realizeze serajе corespunzătoare STAS 4138—58, obținîndu-se ca valoare o medie pentru serajul măsurat pe diametru : $\delta_{1m} = 1{,}478$ mm. Bandajul după ce a fost încălzit la circa 300°C a fost montat pe discul roții care se afla la temperatura de aproximativ 17°C, traductoarele de compensare avînd temperatura de circa 17,5°C.

Scanned with OKEN Scanner

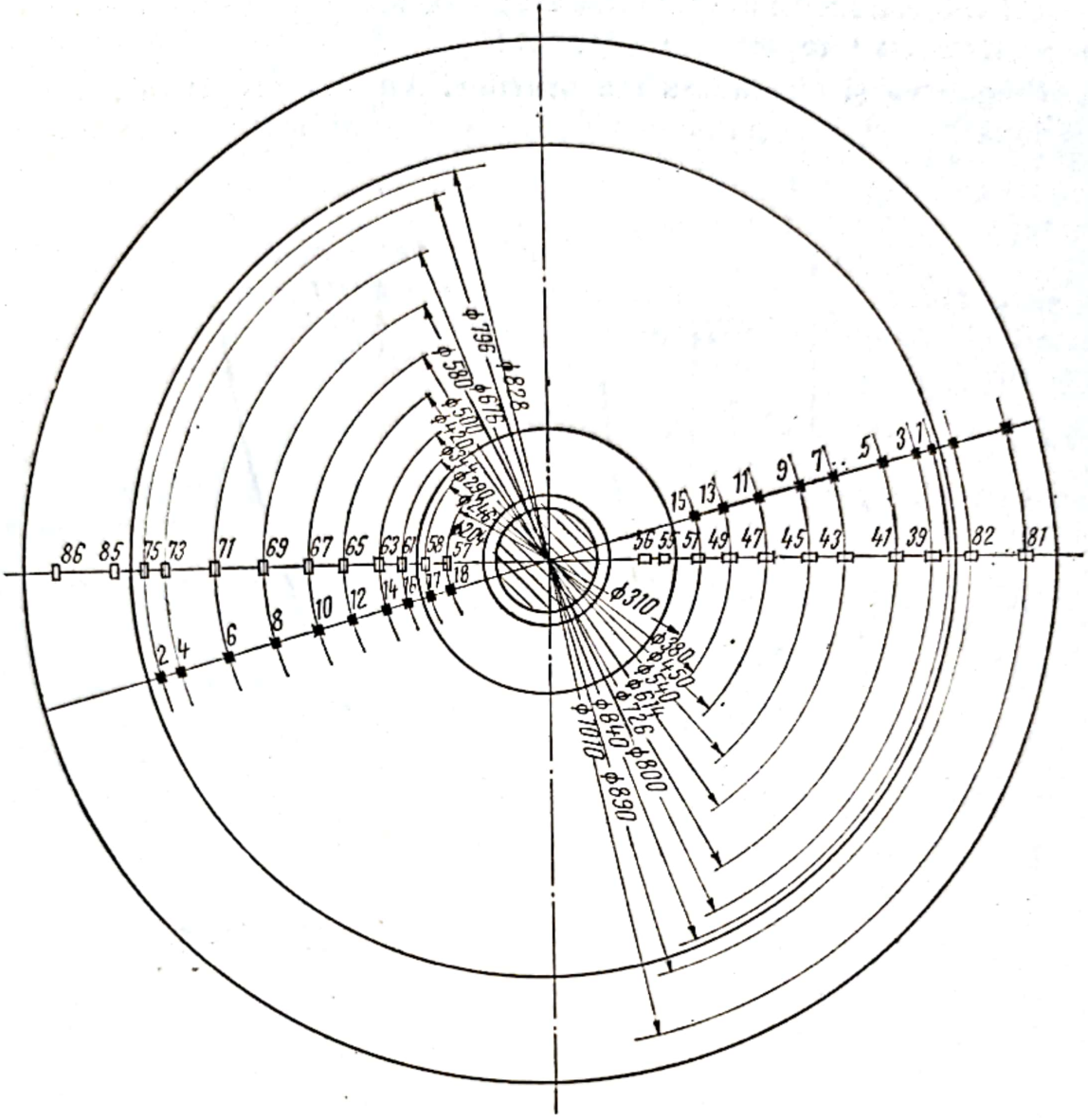

Traductor pe direcția tangentei
Traductor pe direcția razei
Termocuplu

Fig. 3.118.

După aproximativ 8 minute de la aplicare, cînd bandajul, în urma răcirii, a început să strîngă discul roţii, s-a început notarea indicaţiilor punţilor tensometrice; au fost folosite următoarele instalaţii tensometrice:

— punte tensometrică Brüel & Kjaer, cu cutii de echilibrare şi comutare pentru 50 puncte;

— punte tensometrică tip KWS II/5, fabricat Hottinger-Baldwin cu 3 cutii de comutare-echilibrare pentru cîte 10 canale;

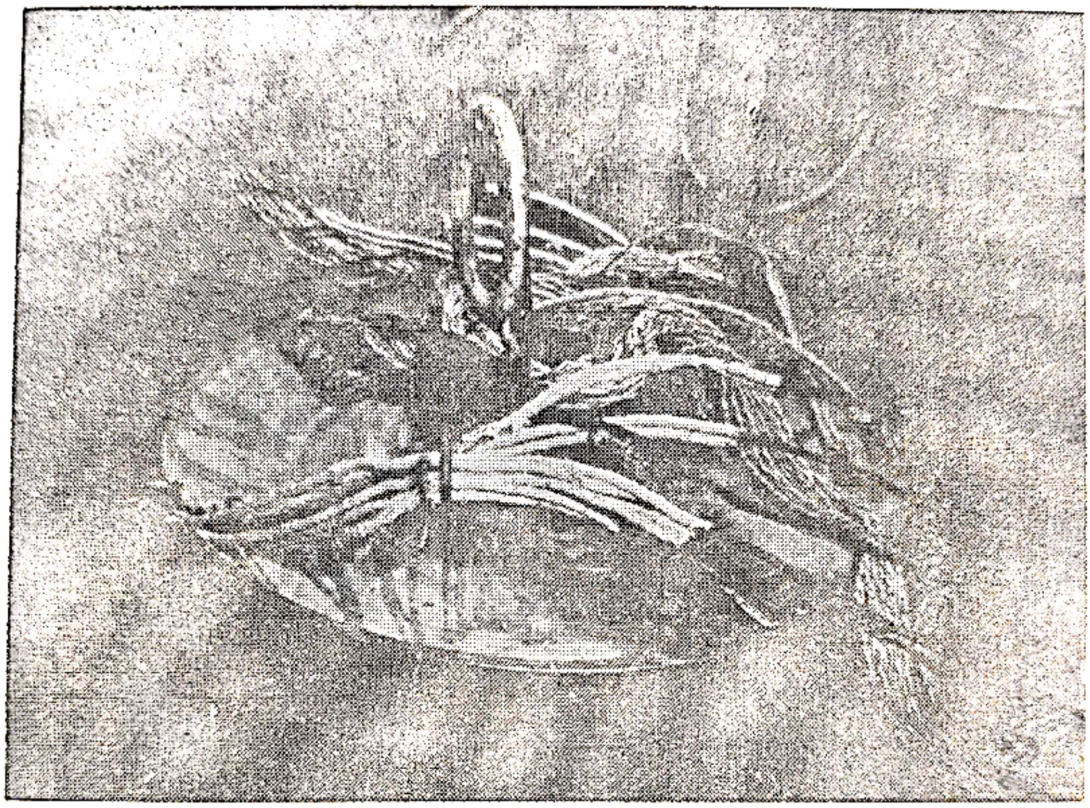


Fig. 3.119.

— punte tensometrică tip IT 1, fabricat Huggenberger, cu cutie de comutare-echilibrare pentru 24 canale.

În figura 3.120 se arată o parte din aparatura folosită la măsurări: în prim plan se văd două potenţiometre pentru înregistrarea temperaturii, în mijloc se vede instalaţia tensometrică Hottinger şi în spate instalaţia Brüel & Kjaer.

Pentru fiecare traductor au fost efectuate cîte 32 citiri de deformaţii specifice $\left(\varepsilon = \frac{1}{k_0}\,\frac{\Delta R}{R_0}\right)$, la fiecare citire notîndu-se timpul la care a fost efectuată; primele 18 citiri au fost efectuate la intervale de cîte 5 min, iar următoarele 14 citiri, la intervale de 15 min. Concomitent au fost înregistrate şi temperaturile din cele 20 de puncte de pe disc şi bandaj în care au fost fixate termocuple, folosindu-se în acest scop 4 înregistratoare potenţiometrice automate cu cîte 6 canale de înregistrare; pe banda de hîrtie a potenţiometrelor a fost notat timpul la care a fost efectuată

Scanned with OKEN Scanner

fiecare citire de deformație specifică, astfel că la prelucrarea rezultatelor s-a putut stabili pe diagramă temperatura corespunzătoare fiecărei citiri.

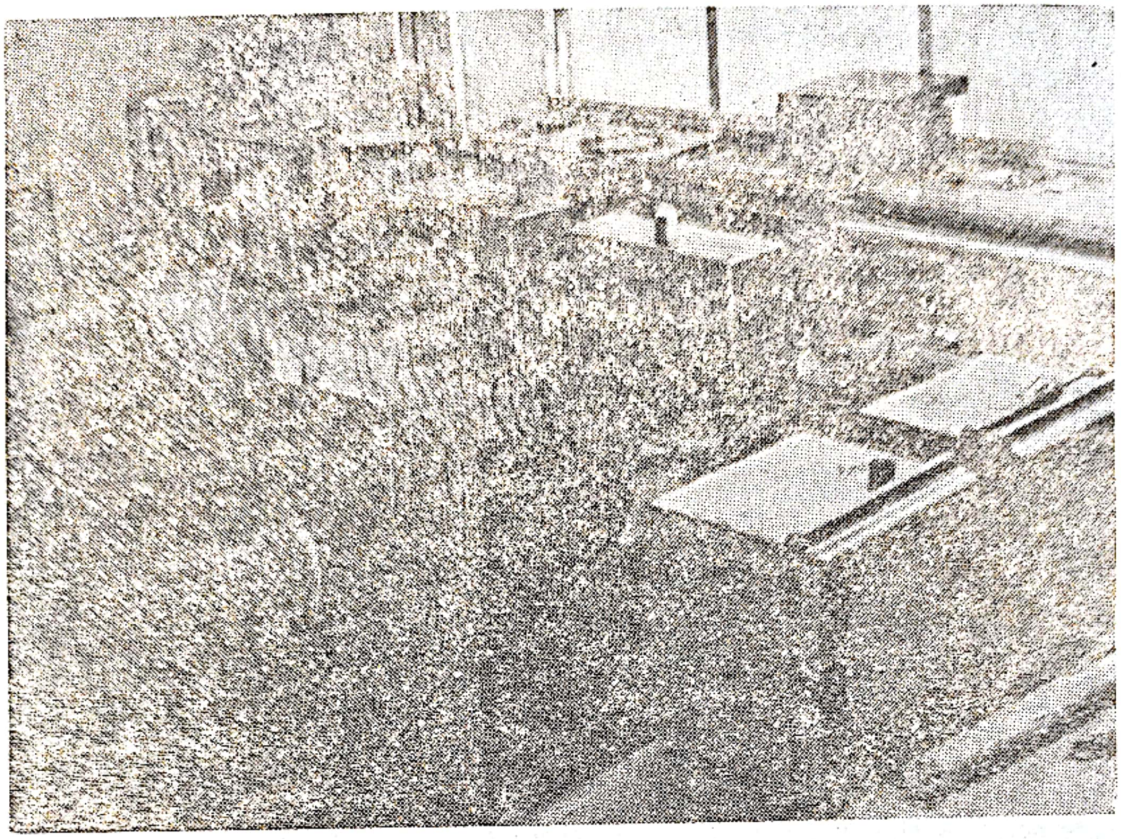


Fig. 3.120

În figura 3.121 se prezintă o porțiune din curbele de variație a temperaturilor înregistrate de unul din potențiometrele folosite.

Prelucrarea rezultatelor măsurărilor. Cu ajutorul valorilor citite la aplicarea la cald a bandajului s-au trasat curbele de variație în timp a deformațiilor specifice indicate de fiecare traductor în parte (ca în fig. 3.122). Din înregistrările potențiometrelor s-a obținut variația în timp a temperaturilor din fiecare punct în care s-a montat termocuplul.

Cunoscînd deformația specifică aparentă și temperatura unui punct la un anumit moment, s-a putut stabili, pe baza curbelor trasate ca în fig. 3.117, valoarea funcției $\Phi(T)$ din punctul respectiv corespunzătoare tipului de traductor și diferenței de temperatură dintre traductorul activ și cel de compensare. Scăzînd această valoare a funcției $\Phi(T)$ din deformația specifică aparentă s-a obținut deformația specifică corespunzătoare solicitării mecanice, produsă în punctul respectiv, de strîngerea bandajului.

Cu valorile deformațiilor specifice stabilite (considerînd că acestea sînt întotdeauna elastice) s-au calculat tensiunile corespunzătoare cu relațiile :

$$\sigma_R = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_R + \mu\varepsilon_t)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_t + \mu\varepsilon_R)$$

Scanned with OKEN Scanner

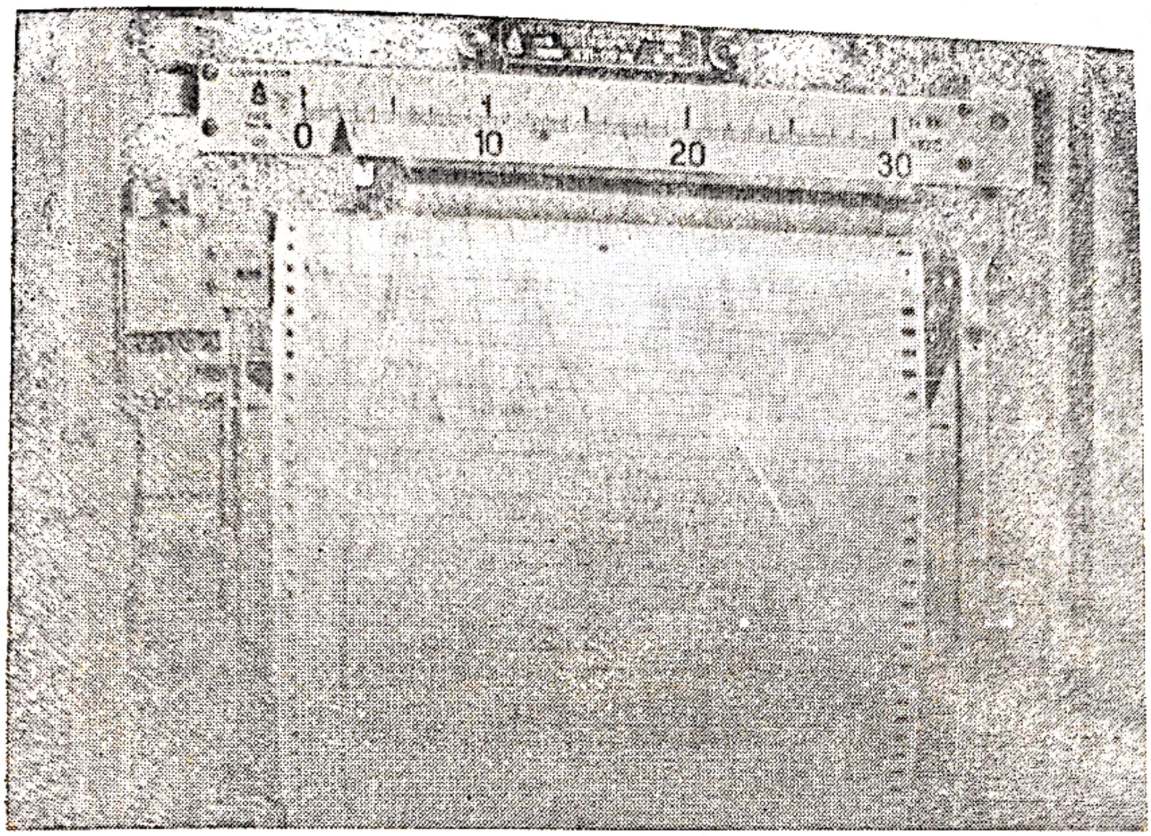


Fig. 3.121.

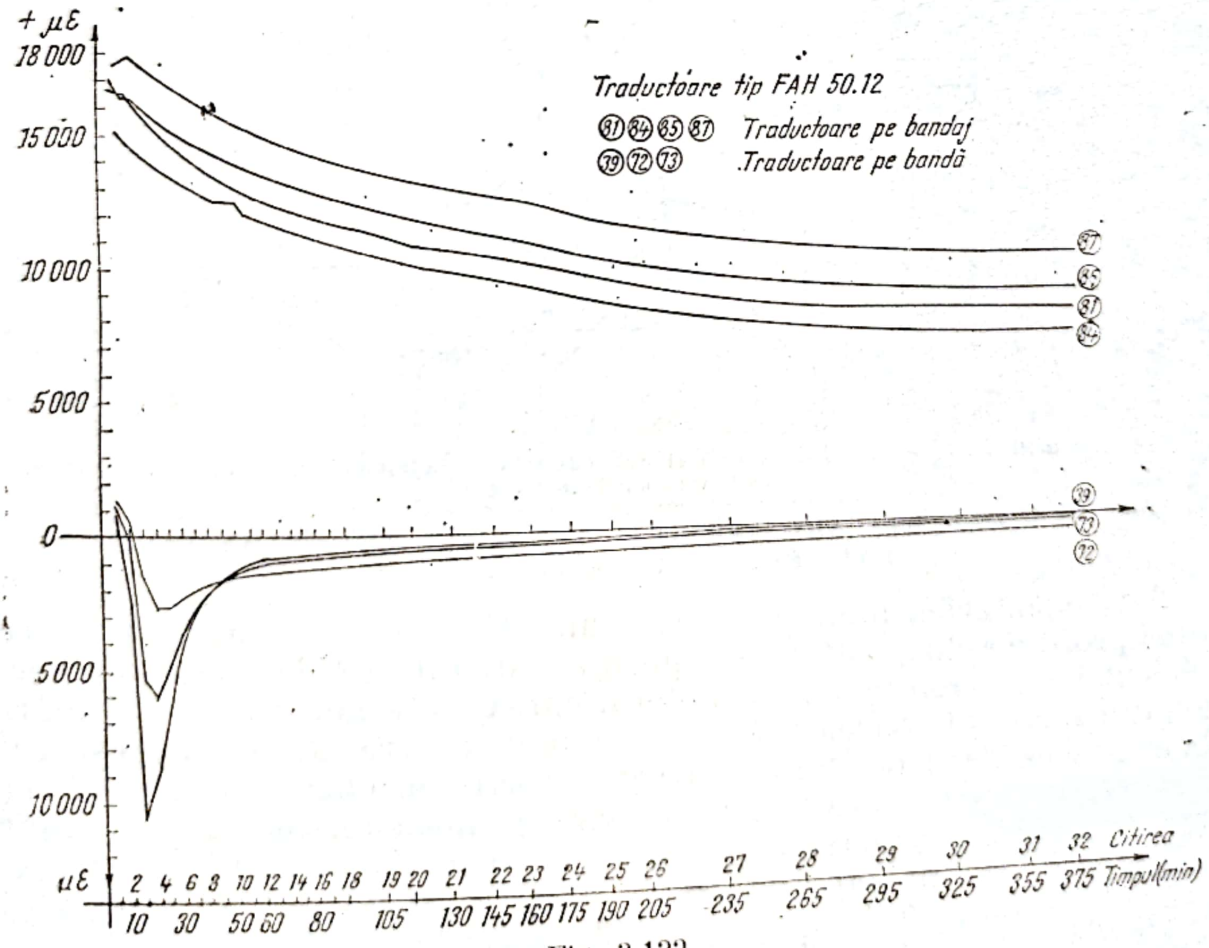


Fig. 3.122.

Scanned with OKEN Scanner

În final, au fost calculate tensiunile echivalente, conform teoriei energiei potențiale pentru modificarea formei, cu formula:

$$\sigma_{ech.} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_t^2 - \sigma_R \cdot \sigma_t}$$

Aceste tensiuni au fost calculate pentru situația finală, rezultată după răcirea bandajului.

Variația pe direcția razei discului a tensiunilor σ_R precum și a tensiunilor echivalente este prezentată în figurile 3.123 și 3.124.

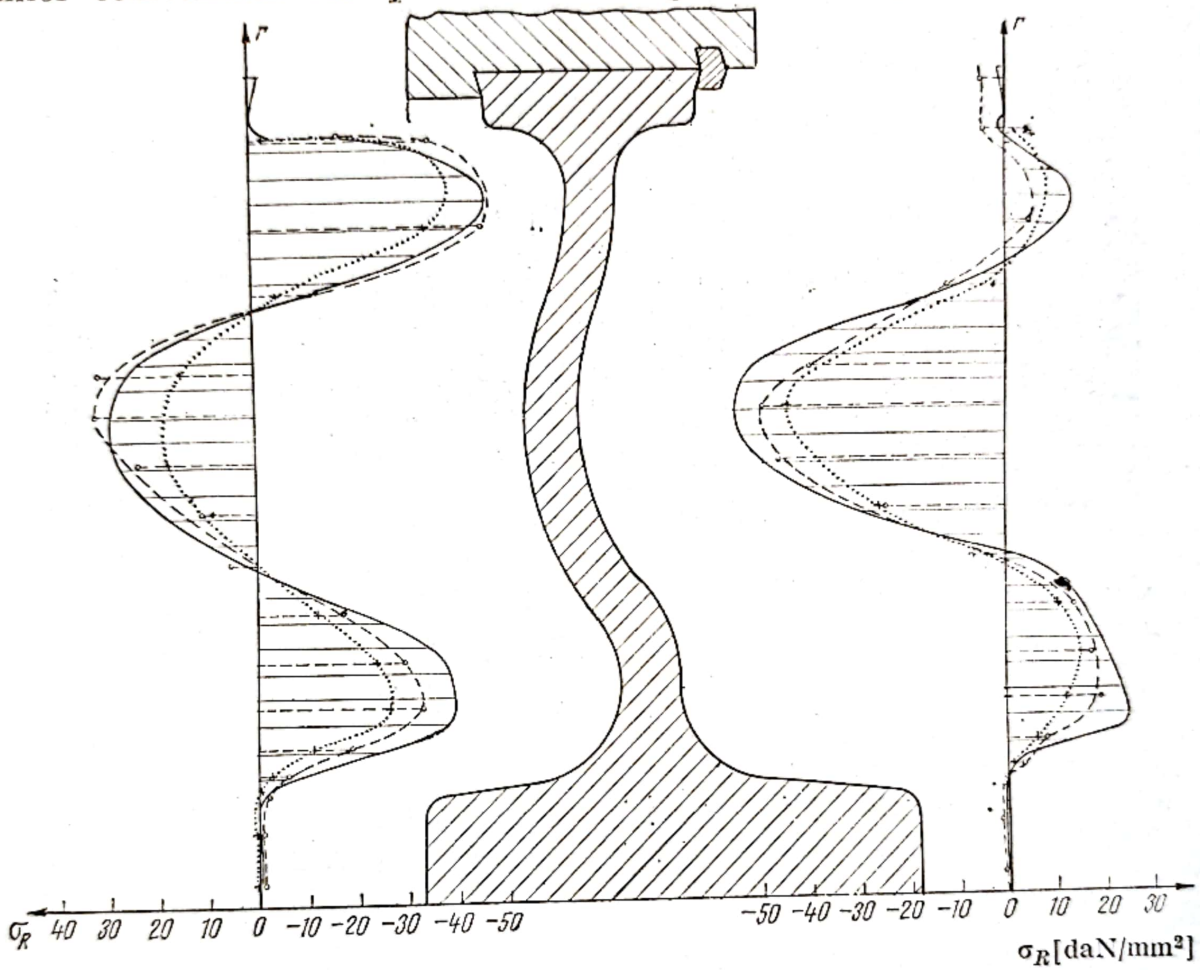


Fig. 3.123.

——— prin calcul; – – – experimental (la aplicarea la cald a bandajului roții); ..... experimental (la tălerea bandajului roții).

3.9.4. DETERMINAREA VARIAȚIEI EFORTURILOR ÎN BARELE UNUI POD DE CALE FERATĂ

Barele podurilor metalice sînt, în majoritatea cazurilor, bare cu pereți subțiri profil deschis, a căror comportare este diferită de aceea considerată în calculele de proiectare. La determinarea experimentală a solicitărilor reale din secțiunile barelor, trebuie avut în vedere faptul că acestea sînt solicitate complex; în afară de efortul axial considerat în calcule, acționează eforturi secundare de încovoiere și răsucire, astfel că tensiunea dintr-un punct oarecare i al secțiunii va fi dată de relația (3.72):

$$\sigma_i = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I_z} y_i - \frac{M_y}{I_y} z_i + \frac{B}{I_\omega} \omega_i$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru determinarea celor patru solicitări din relaţia (3.72) este necesar, aşa cum s-a arătat la § 3.8.5., să fie aplicate în secţiune cel puţin patru traductoare tensometrice.

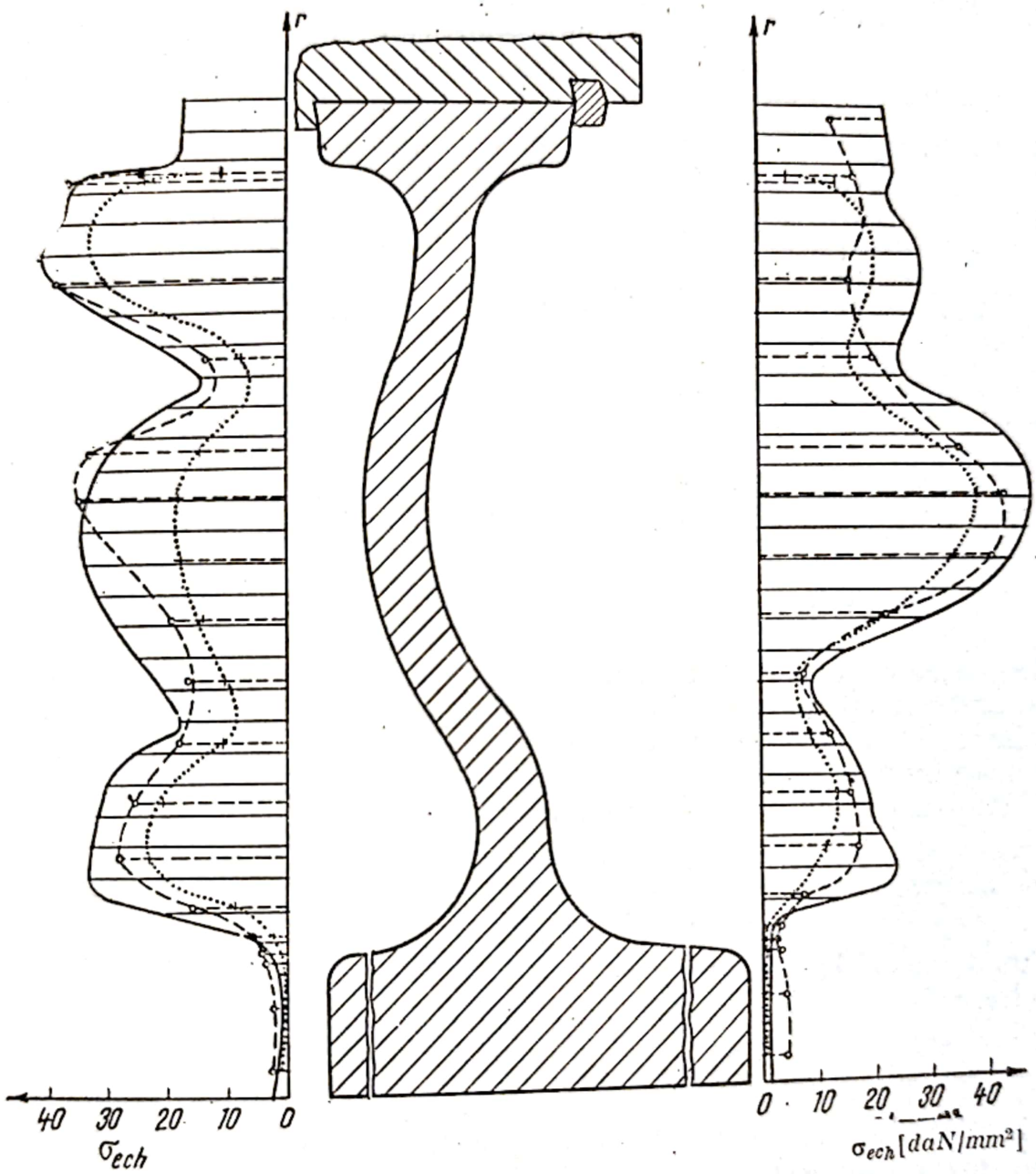


Fig. 3.124.

Adesea, în special în cazul solicitărilor variabile, este necesar să se măsoare direct una din componentele deformaţiei specifice respectiv una din solicitările sau din sarcinile aplicate elementului studiat. Aceasta se poate obţine printr-o plasare corespunzătoare a traductoarelor în secţiune şi în braţele punţii de măsură.

Scanned with OKEN Scanner

Astfel s-a procedat pentru înregistrarea variației componentelor tensiunii normale produse de momentele încovoietoare și a celei produse de bimomentul de încovoiere-răsucire din secțiunile barelor unui pod de cale ferată.

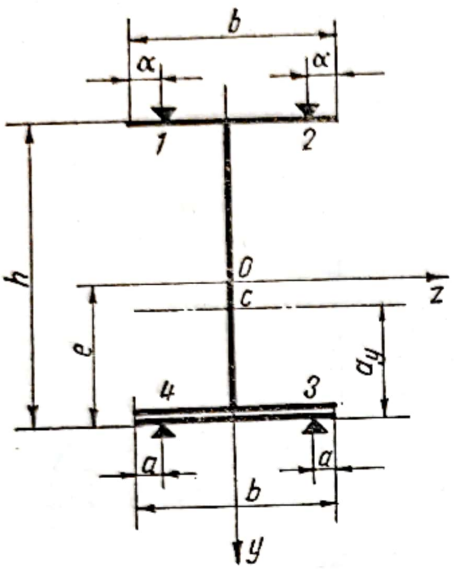


Fig. 3.125.

Pornind de la relația (3.73) și folosind indicațiile a patru traductoare plasate în secțiune (fig. 3.125) s-au stabilit, (cu $E = 2{,}1 \times 10^6$ daN/cm² și $\alpha = a$) relațiile :

$$\sigma_{z_s} = \frac{M_z}{I_z} y_s =$$

$$= 1{,}05 \frac{h-e}{h} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.78)$$

$$\sigma_{\omega_{max}} = \frac{B}{I_\omega} \omega_{max} =$$

$$= 1{,}05 \frac{b}{b-2a} \cdot \frac{h-a_y}{h} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4). \quad (3.79)$$

Se observă din relațiile (3.78) și (3.79) că se obține ușor un semnal proporțional cu σ_{z_s} și $\sigma_{\omega_{max}}$ printr-un montaj al traductoarelor în punte întreagă care să realizeze însumarea algebrică a deformațiilor specifice conform semnelor termenilor din paranteze.

Pentru componenta σ_y, cu notațiile din figura 3.125 se obține :

$$\sigma_y = 1{,}05 \frac{b}{b-2\alpha} \frac{a_y}{h} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + 1{,}05 \frac{b}{b-2a} \frac{h-a_y}{h} (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.80)$$

Punînd condiția de egalitate a coeficienților celor două paranteze, rezultă relația :

$$\frac{b-2a}{b-2\alpha} = \frac{h-a_y}{a_y} \quad (3.81)$$

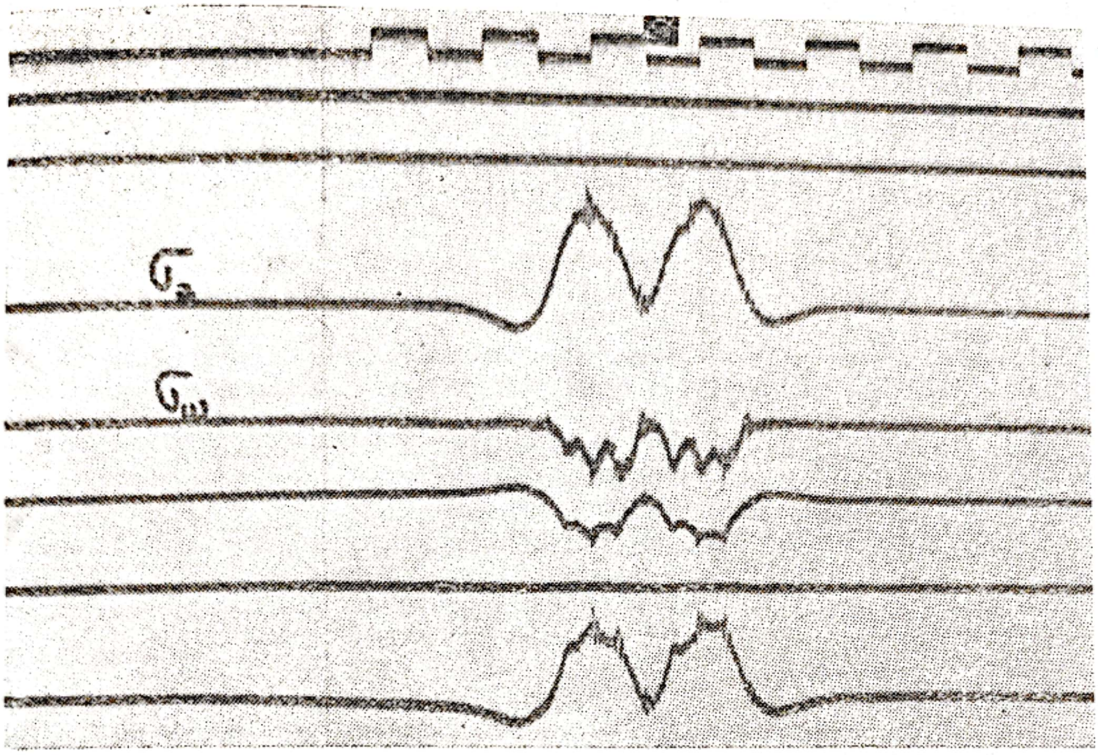
din care s-a putut stabili distanța α în funcție de a, astfel încît relația (3.80) s-a putut scrie sub forma :

$$\sigma_y = K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.82)$$

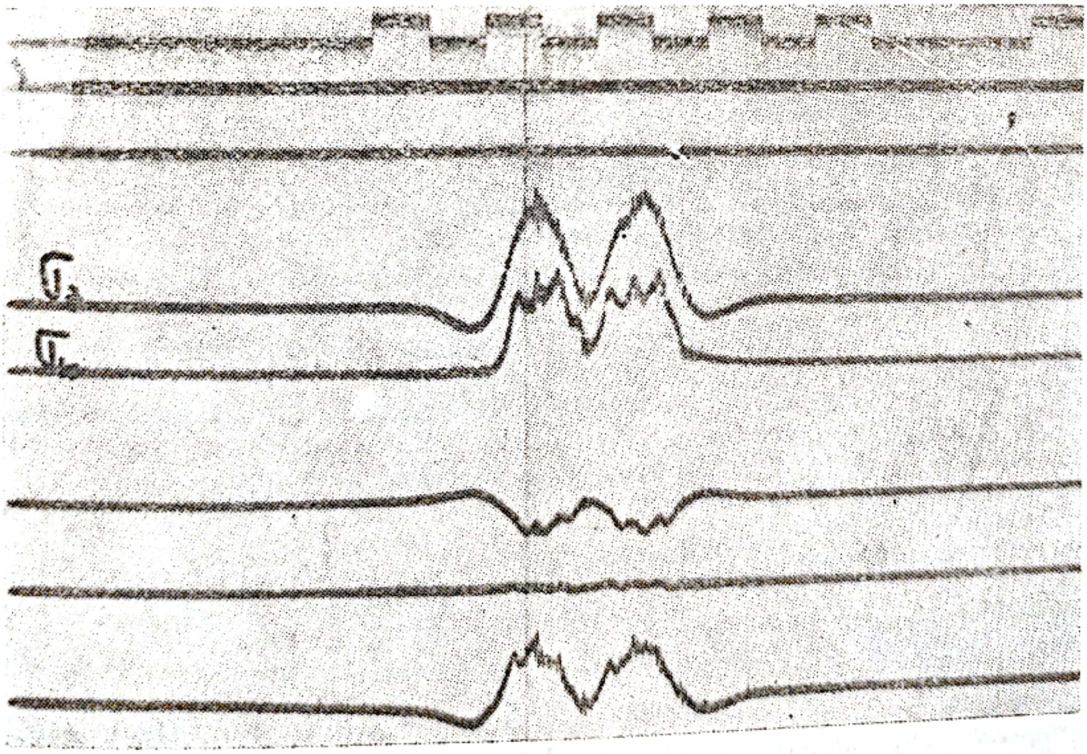
Folosind scheme de montare a traductoarelor în punte corespunzătoare relațiilor stabilite au putut fi înregistrate variațiile fiecărei componente în parte.

În figura 3.126 se prezintă fragmente din oscilogramele care au înregistrat variația tensiunilor σ_z și σ_ω la un lonjeron de pod de cale ferată la trecerea unei locomotive de probă ; înregistrările au fost efectuate în două variante de rezemare a traverselor : la oscilograma din figura 3.126, a,

Scanned with OKEN Scanner



a)



b)

Fig. 3.126.

traversele au rezemat pe toată latura tălpii iar la cea din figura 3.126, b, traversele au rezemat spre marginea interioară a tălpii lonjeronului. Se vede că variaţia lui σ_z rămîne practic aceeaşi pe cînd variaţia lui σ_ω se modifică foarte mult.

A fost pusă astfel în evidenţă influenţa puternică a modului de rezemare asupra mărimii tensiunilor corespunzătoare solicitării de torsiune împiedicată.

BIBLIOGRAFIE

1. AMALINEI, N., *O nouă variantă a punţii tensometrice cu 1 canal fabricaţie IEMI*, Lucrare prezentată la cea de a XIII-a Conferinţă naţională a cercurilor ştiinţifice studenţeşti, Braşov, 6—7 martie 1976
2. BECKERS, J. H., *Zum Wahl von Gleichspannungs-oder Trägerfrequenzverfahren beim elektrischen Messen mechanischer Grössen*, VDI, vol. 112, nr. 20 şi 21, Düsseldorf, 1970
3. BÖHM, W., WOLF, H., *Dehnungs -und Temperaturmessungen am Aussengehäuse einer Gasturbine*. În: Messtechnische Briefe 1/1970, HBM
4. BRIDE, W. L., *Ring Gauge for Biaxial Strain Analysis*, *Strain* vol. 11, nr. 2, 1975
5. BUGA, M., *Încercări de rezistenţă asupra vagonului transportor cu 20 de osii al CFR*. În: Revista Căilor Ferate, nr. 4/1968
6. BUGA, M., RUSIU, GH., HALCHINI, C., *Distribution of strain gauges for the measurements of stresses and loadings in bars subject to complex stresses*. În vol: Symposion on experimental techniques in applied mechanics. Institutul Politehnic Bucureşti, noiembrie 1972
7. BURADA, C., *Contribuţii la determinarea solicitărilor în roata disc a vagonului de cale ferată*. (Teză de doctorat), Institutul Politehnic Iaşi, 1976
8. BUSH, A. J., *Strain-gage Installations for Adverse Environments*, *Experimental Mechanics*, vol. 9, nr. 4, 1969
9. BUZDUGAN, GH., BLUMENFELD, M., *Tensometria electrică rezistivă*, Editura tehnică, Bucureşti, 1966
10. BUZDUGAN, GH., *La mesure des vibrations mécaniques*, Editions Eyrolles, Paris, 1968
11. FRICKE, H. W., *Die Dehnungsmessstreifen und ihre Anwendung*. În: Draht-Fachzeitschrift, nr. 4, 5, 6 şi 8 din 1967, Prost & Meiner-Verlag, Coburg
12. GRAVE, H. F., *Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice*, Editura tehnică, Bucureşti 1966
13. HARRIS, C. M., CREDE, C. E., *Şocuri şi vibraţii*, vol. I, Editura tehnică, Bucureşti, 1968
14. KULAR, G. S., *Use of Foil Strain Gage at High Hydrostatic Pressure*. În: *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 29, nr. 2, 1972
15. LEMCOE, M. M., *Errors in High-temperature Strain Measurements*, *Experimental Mechanics*, vol. 8, nr. 2, 1968
16. LUDEWIG, M., *Schwingungsmessungen an Turbinenschaufeln von Abgasturboladern mit Hochtemperatur-Dehnungsmessstreifen*. În: Messtechnische Briefe 1/1969, HBM
17. MALSAN, P., *Jauge d'extensométrie en semi-conducteur*. In: Extensométrie, Paris, 1968
18. MICHEL, M., *Instrumentation moderne en extensométrie*. In: Mesures, aug.-sept. 1969
19. MOCANU, D. R., BUGA, M., GEORGESCU, C., *Determinarea experimentală a eforturilor unitare*, Editura Transporturilor şi Telecomunicaţiilor, Bucureşti, 1966

Scanned with OKEN Scanner

20. MOCANU, D.R., BUGA, M., HALCHINI, C., TEODORU, M., *Utilizarea tensometriei electrice la determinarea eforturilor unitare*, Editura Institutului Central de Documentare Tehnică, Bucureşti, 1967
21. MOCANU, D. R., BUGA, M., *Distribution des contraintes le long des cordons latéraux de soudure et dans les tôles*. În vol.: La 4-e Conférence internationale d'analyse des contraintes, Cambridge, 1970
22. MALIKOV, G. F., SNEIDERMAN, A. L., SULEMOVICI, A. M., *Rascetî uprughih tenzometriceskih elementov*, *Izdatelstvo Maşinostroienie*, Moskva, 1964
23. NEUBERT, H. K. P., *Strain Gauges-Kind and Uses*, *Macmillan*, London, 1967
24. PERRY, C. C., LISSNER, H. R., *The Strain Gage Primer*, *Mc. Graw-Hill Book Company*, Inc., New-York, 1962
25. ROHRBACH, CHR., *Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Grössen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1967
26. SCHEFFLER, M., *Umschalt-und Messwerterfassungsanlagen, vom Kleingerät bis zur automatischen Grossanlage*. In: Vorträge für die Kursteilnehmer INTERKAMA, Düsseldorf, 1974
27. SCHMID, E., HELLWIG, R., MÜLLER, H. W., *Messung der Verschiebungen zwischen Welle und Nabe an Kegel-Press-Verbänden*. În: Messtechnische Briefe, 1/1969, HBM
28. SCHOCK, R. N., DUBA, A. G., *Pressure Effects on the Response of Foil Strain Gages*, *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 30, nr. 1, 1973
29. SENNHENN, E., *Gleichspannungs-und Trägerfrequenzmessverfahren unter Berücksichtigung neuerster Technologie*, *Messverstärker und Folgegeräte*. În: Vorträge für die *Kursteilnehmer INTERKAMA*, Düsseldorf 1974
30. SENNHENN, E., *Messverstärker*, *Kompensatoren und Folgegeräte für ohmsche und induktive Messwertaufnehmer*. În: Industrie-elektrik + elektronik, nr. 23/24, 1972
650° C. In: Messtechnische Briefe, 3/1968, HBM
31. TSHIERSCHKE, P., *Messung der behinderten Wärmedehnung bei Temperaturen bis zu*
32. VAUGHAN, J., *Application of Brüel & Kjaer Equipment to Strain Measurements*, Editat de Brüel & Kjaer, 1975
33. WINDOW, A. L., *Some Notes on the Design of Simple Cantilever Type Transducers*, *Strain*, vol. 6, nr. 1, 1970
34. * * * *La réalisation des capteurs à jauges électriques* (Budd)
35. * * * *Messtechnische Briefe für elektrisches Messen mechanischer Grössen*, *Hottinger-Baldwin Messtechnik*, Darmstadt, 1965 ... 1975
36. * * * *Prospecte şi instrucţiuni de utilizare*, Hottinger-Baldwin Messtechnik, Darmstadt
37. * * * *Prospecte şi instrucţiuni de utilizare*, Vishay Micromeasurements Messtechnik, München
38. * * * *Prospecte şi instrucţiuni de utilizare*, Philips

Scanned with OKEN Scanner

4.

FOTOELASTICITATEA

Dr. ing. N. ILIESCU,
Prof. dr. ing. L. BOLEANTU
Prof. dr. ing. I. PĂSTRĂV

Printre mijloacele cele mai folosite în analiza experimentală a stării de tensiune se numără și fotoelasticitatea. Fotoelasticitatea, ca și fotoplasticitatea sau fotovîscoelasticitatea, este una din metodele de investigație ale fotomecanicii, bazată pe interpretarea datelor rezultate din măsurarea birefrigerenței accidentale. Avînd la bază principiile opticii experimentale și teoria matematică a elasticității, fotoelasticitatea s-a remarcat de la început ca o tehnică experimentală simplă și cu posibilități largi de aplicare în analiza stării de tensiuni și deformații. Spre deosebire de alte metode tensometrice (mecanice, optice sau electrice), care furnizează informații în puncte discrete, fotoelasticitatea permite obținerea unui tablou complet al cîmpului de tensiune, dînd astfel posibilitatea determinării stării de tensiune (în mărime și direcție) în orice punct. Avînd o mare utilitate practică în determinarea concentrărilor de tensiuni și a stărilor de tensiune în piesele cu forme geometrice complicate, fotoelasticitatea a devenit o unealtă de preț pentru ingineri în proiectarea rațională a organelor de mașini și elementelor structurale.

4.1. NOȚIUNI DE OPTICĂ GENERALĂ

4.1.1. NATURA LUMINII

După cum este cunoscut, pentru a explica comportarea energiei radiate, fizica modernă admite că lumina are o dublă natură : corpusculară și ondulatorie. Potrivit concepției corpusculare, lumina este considerată ca un flux de particule foarte mici proiectate în toate direcțiile de la sursă. Conceptul lui Maxwell privind natura ondulatorie [1], presupune că lumina este o perturbație a cîmpului electromagnetic reprezentată prin doi vectori, unul electric și celălalt magnetic, perpendiculari între ei și pe direcția de propagare. Comportarea luminii poate fi studiată considerînd doar unul din cei doi vectori, care se va numi vector luminos. În cele ce urmează, pentru a ușura înțelegerea efectului fotoelastic se presupune că lumina obișnuită reprezintă o perturbație a cîmpului electromagnetic în

Scanned with OKEN Scanner

care particulele vibrează în plane ce conţin direcţia de propagare. În această schemă de vizualizare a fenomenului optic, vectorul luminos reprezintă direcţia de vibraţie a acestor particule şi amplitudinea vibraţiei la un moment dat.

În cazul luminii ordinare (cum este lumina emisă de un bec), vectorul luminos poate fi considerat ca fiind compus dintr-un număr arbitrar de vibraţii transversale reprezentate prin vectorii $A_1(t), A_2(t), \ldots, A_n(t)$; (fig. 4.1).

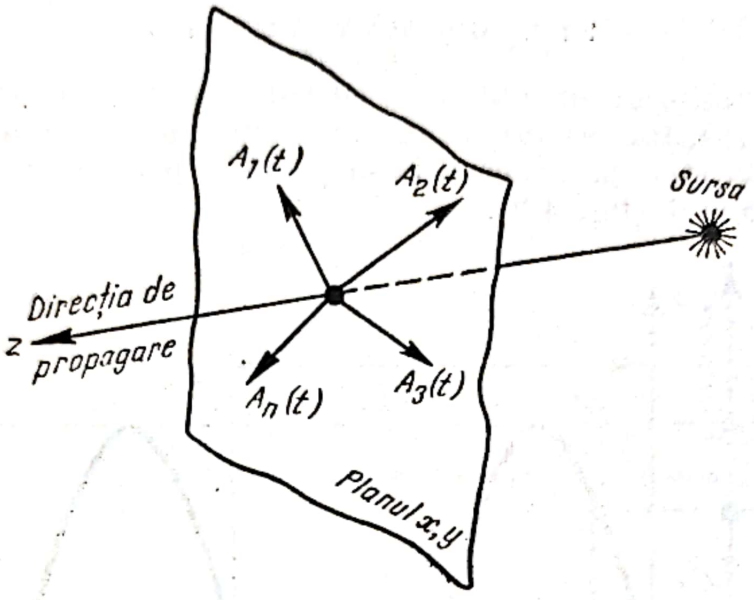


Fig. 4.1.

Lumina concepută ca o perturbaţie electromagnetică se propagă cu o anumită viteză care depinde de densitatea mediului. Astfel în vid lumina are o viteză maximă de propagare $c = 2{,}997 \cdot 10^8$ m/s, în timp ce în oricare alt mediu transparent viteza este mai mică. Raportul dintre viteza luminii în vid c şi viteza de propagare v_i printr-un mediu oarecare, poartă numele de indice absolut de refracţie n_i

$$n_i = \frac{c}{v_i}. \tag{4.1}$$

Dacă notăm cu $n_1 = \frac{c}{v_1}$ şi cu $n_2 = \frac{c}{v_2}$ indicii absoluţi de refracţie pentru două medii diferite, se poate defini indicele relativ de refracţie

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \tag{4.2}$$

Efectul fiziologic produs de o rază de lumină care cade pe ochiul unui observator, depinde de lungimea de undă şi amplitudinea radiaţiei luminoase. Astfel culoarea observată este determinată de lungimea de undă λ, în timp ce strălucirea depinde numai de amplitudinea radiaţiei

luminoase. Este de remarcat că ochiul omenesc sesizează culori corespunzătoare unor lungimi de undă care variază între $\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ m (violet) și $\lambda = 7{,}2 \cdot 10^{-7}$m (roșu închis). Lumina albă obișnuită se obține atunci cînd unor spectrul vizibil este observat simultan. Lumina monocromatică sau omogenă este compusă din vibrații transversale a căror lungime de undă este aproximativ aceeași sau variază într-o bandă foarte îngustă de lungimi de undă.

4.1.2. MIȘCAREA ARMONICĂ

Un punct material execută o mișcare armonică simplă, cînd se mișcă pe o dreaptă, avînd în orice moment accelerația îndreptată spre un punct fix aflat pe traiectoria sa și direct proporțională cu distanța față de acest punct (fig. 4.2).

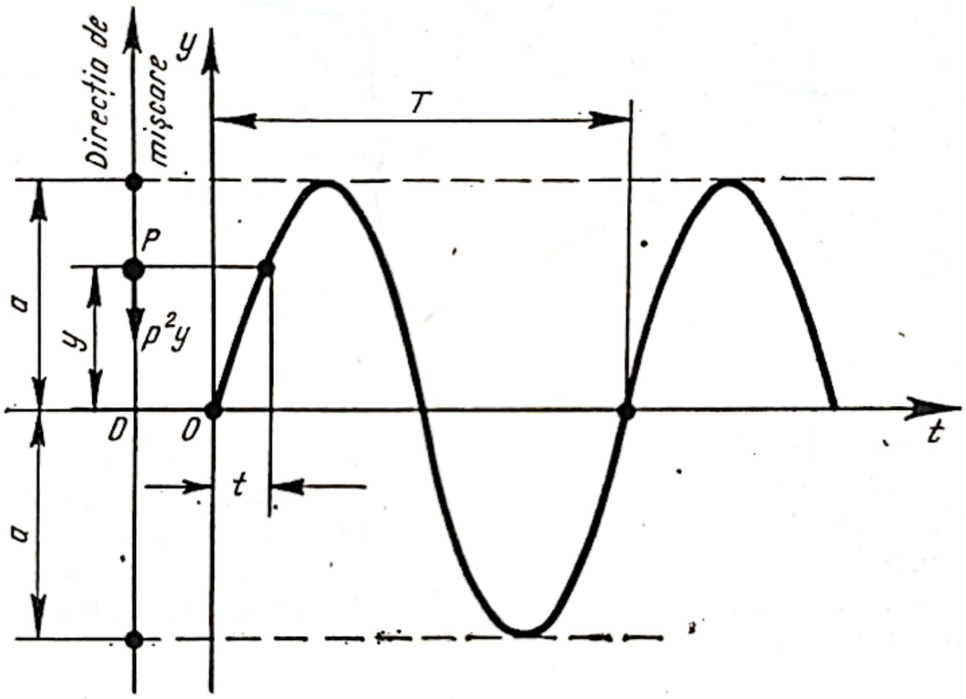


Fig. 4.2.

Ecuația diferențială care guvernează acest tip de mișcare este

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -p^2y$$

unde t este timpul, y este distanța la momentul t față de punctul fix (elongația), iar p este pulsația mișcării. Soluția generală a acestei ecuații diferențiale este de forma

$$y = a \sin (pt + \varphi). \tag{4.3}$$

Aceasta reprezintă ecuația mișcării armonice simple în care a este elongația maximă numită amplitudine, iar φ este diferența de fază unghiulară. În

Scanned with OKEN Scanner

cazul în care diferența de fază unghiulară φ este zero, ecuația de mișcare devine

$$y = a \sin pt \text{ sau}$$

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T} \tag{4.4}$$

unde T este perioada mișcării, măsurată în secunde și reprezintă timpul în care se execută o oscilație completă (fig. 4.2).

Frecvența f este definită ca inversul perioadei și se exprimă în rotații pe secundă. Între pulsație, perioadă și frecvență există următoarea relație

$$p = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

Mișcarea armonică simplă poate fi sugerată și cu ajutorul mișcării circulare. Să considerăm un punct material P care se mișcă pe un cerc de rază a cu o viteză unghiulară constantă ω (fig. 4.3). Proiecția punctului P pe diametrul vertical execută o mișcare armonică simplă reprezentată prin următoarea ecuație

$$y = a \sin \omega t$$

unde $\omega t = \psi$ este unghiul de fază sau faza unghiulară.

Două mișcări armonice simple care au loc în plane perpendiculare, având aceeași perioadă și o diferență de fază φ între ele se reprezintă prin ecuația

$$x = a \sin pt$$

$$y = b \sin (pt + \varphi). \tag{4.5}$$

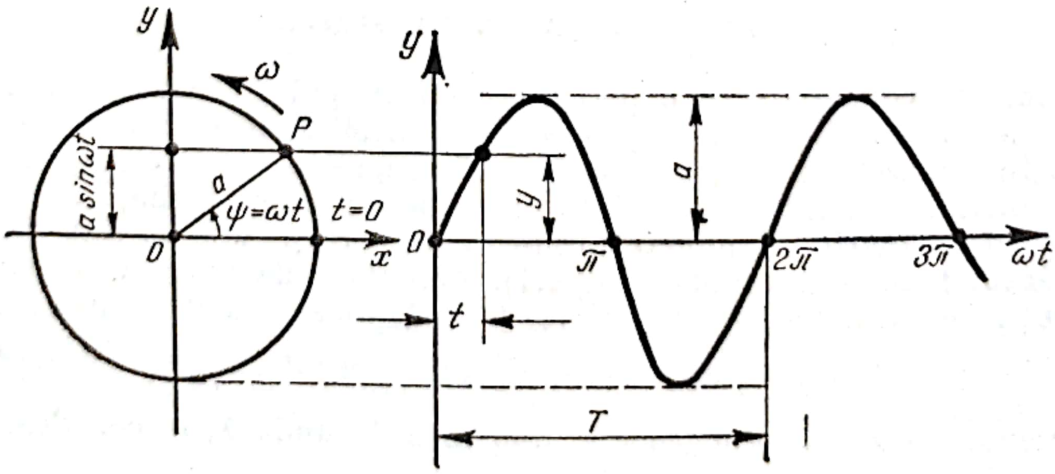


Fig. 4.3.

Scanned with OKEN Scanner

Prin compunerea celor două mişcări se obţine o mişcare rezultantă. Ecuaţia traiectoriei mişcării rezultante se obţine eliminînd parametrul t între cele două relaţii (4.5)

$$\frac{x_2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2\frac{xy}{ab}\cos\varphi = \sin^2\varphi. \tag{4.6}$$

Ecuaţia (4.6) reprezintă o elipsă şi deci prin compunerea a două mişcări armonice simple situate în plane perpendiculare, se obţine o mişcare eliptică. În legătură cu această mişcare este important să se analizeze două cazuri particulare :

a) Cele două mişcări au aceeaşi amplitudine $a = b$ şi diferenţa de fază $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$.

În acest caz,

$$x^2 + y^2 = a^2 = b^2$$

şi deci rezultanta a două mişcări armonice simple situate în plane perpendiculare, avînd aceeaşi perioadă şi amplitudine, dar diferenţa de fază $\varphi = \frac{\pi}{2}$, este o mişcare circulară.

b) Cele două mişcări au o diferenţă de fază $\varphi = 0$. Ecuaţia (4.6) în acest caz devine

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2\frac{xy}{ab} = 0$$

sau

$$(xb - ya)^2 = 0.$$

Rezultanta în acest caz este o mişcare rectilinie pe o direcţie care trece prin cadranele unu şi trei ale cercului trigonometric.

4.1.3. UNDE ARMONICE SIMPLE

Lumina concepută ca o perturbaţie a cîmpului electromagnetic, aşa cum s-a văzut, se propagă prin mediile transparente sub forma unor unde. În cele ce urmează, pentru simplificare, se consideră o singură undă de lumină, care poate fi asimilată cu o undă armonică simplă. În acest caz, poziţia diferitelor puncte aflate în mişcare pe axa x, este dată la momentul t de o sinusoidă (fig. 4.4). Lungimea de undă λ, reprezintă distanţa dintre două puncte aflate în fază, măsurată în lungul axei x.

Unda luminoasă se propagă în lungul axei x cu viteza $c = 2{,}997 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Cunoscînd viteza de propagare c, lungimea de undă λ, se calculează cu relaţia

$$\lambda = cT \tag{4.7}$$

Scanned with OKEN Scanner

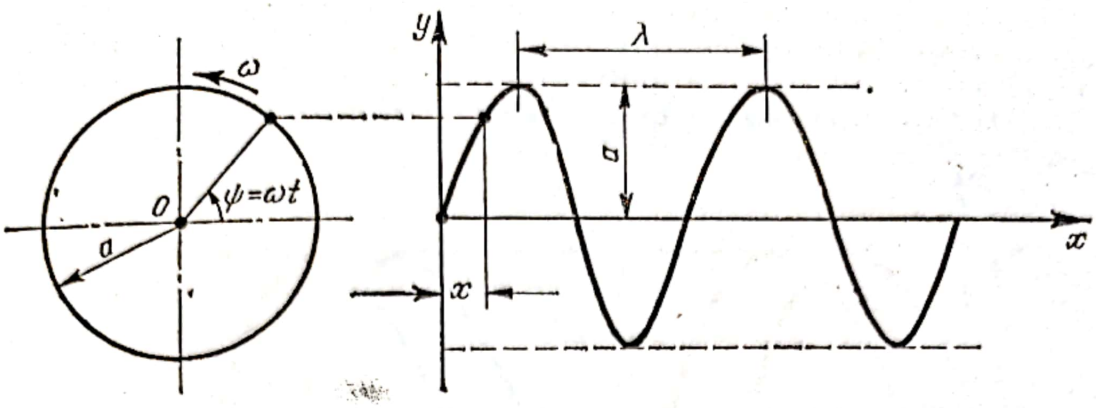


Fig. 4.4.

Unghiul de fază

$$\psi = pt = \frac{2\pi}{T} t \tag{4.8}$$

corespunde unui punct situat pe axa Ox la distanța

$$x = ct. \tag{4.9}$$

Eliminînd timpul între (4.8) și (4.9) și ținînd seama de (4.7), unghiul de ază ψ, poate fi exprimat în funcție de x și de lungimea de undă λ

$$\psi = \frac{2\pi x}{\lambda}. \tag{4.10}$$

Analog, diferența de fază unghiulară φ, din ecuația (4.3), poate fi exprimată în funcție de x și λ

$$\varphi = \frac{2\pi x}{\lambda}$$

astfel că relația (4.3) devine

$$y = a \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)$$

sau, ținînd seama de (4.7),

$$y = a \sin\frac{2\pi}{\lambda}(ct + x). \tag{4.11}$$

Expresia (4.11) reprezintă ecuația unei unde care se propagă în sensul negativ al axei Ox. În cele ce urmează se va considera că undele luminoase se deplasează în sensul pozitiv al axei x, astfel că ecuația acestor unde este de forma

$$y = a \sin\frac{2\pi}{\lambda}(x - ct). \tag{4.12}$$

Scanned with OKEN Scanner

Se consideră o undă luminoasă care la momentul $t = 0$ este reprezentată prin sinusoida trasată cu linie continuă în fig. 4.5. Unda se deplasează în lungul axei x cu viteza c, potrivit ecuației (4.12), astfel că după un timp $t = t$, va ocupa poziția desenată cu linie întreruptă.

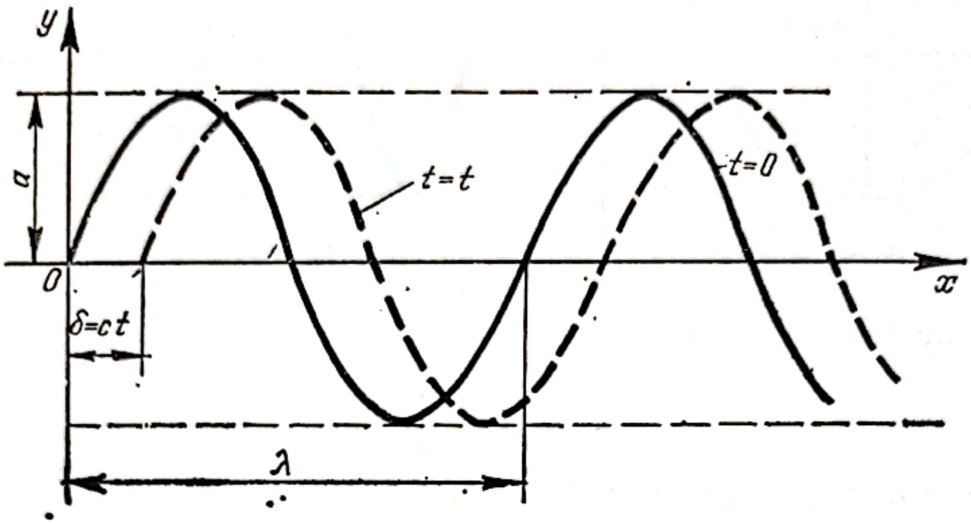


Fig. 4.5.

În noua poziție unda se găsește deplasată față de poziția inițială cu distanța $\delta = ct$, care poartă numele de diferență de fază liniară. Așa cum rezultă din (4.10), între diferența de fază unghiulară și cea liniară există următoarea relație de legătură.

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta. \tag{4.13}$$

Ținînd seama de (4.13), ecuațiile a două unde care au între ele o diferență de fază liniară δ, se scriu astfel

$$y_1 = a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x + \delta - ct)$$

$$y_2 = a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x - ct). \tag{4.14}$$

4.1.4. LUMINA POLARIZATĂ

În schematizarea fenomenului optic, făcută mai înainte, am admis că lumina reprezintă o perturbație a cîmpului electromagnetic, în care particulele vibrează în toate direcțiile cuprinse într-un plan perpendicular pe direcția de propagare. Dacă particulele aflate în mișcare, descriu traiectorii bine determinate într-un plan perpendicular pe direcția de propagare, lumina este polarizată. Cînd traiectoria mișcării este o dreaptă perpendiculară pe direcția de propagare, lumina este polarizată plan (fig. 4.6, a).

Scanned with OKEN Scanner

Cînd traiectoria este un cerc, lumina este polarizată circular (fig. 4.6, b), iar cînd este o elipsă este polarizată eliptic (fig. 4.6, c).

Lumina obișnuită poate fi polarizată prin mai multe metode: cu ajutorul cîmpului electrostatic sau electromagnetic, prin reflexii sau

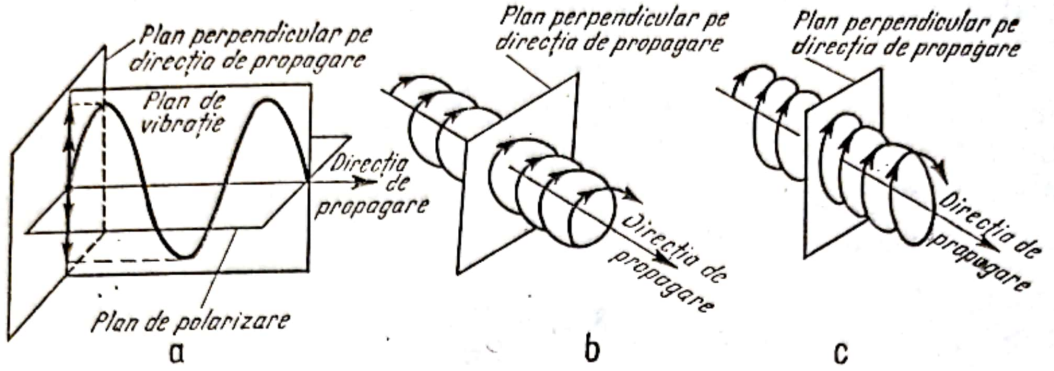


Fig. 4.6.

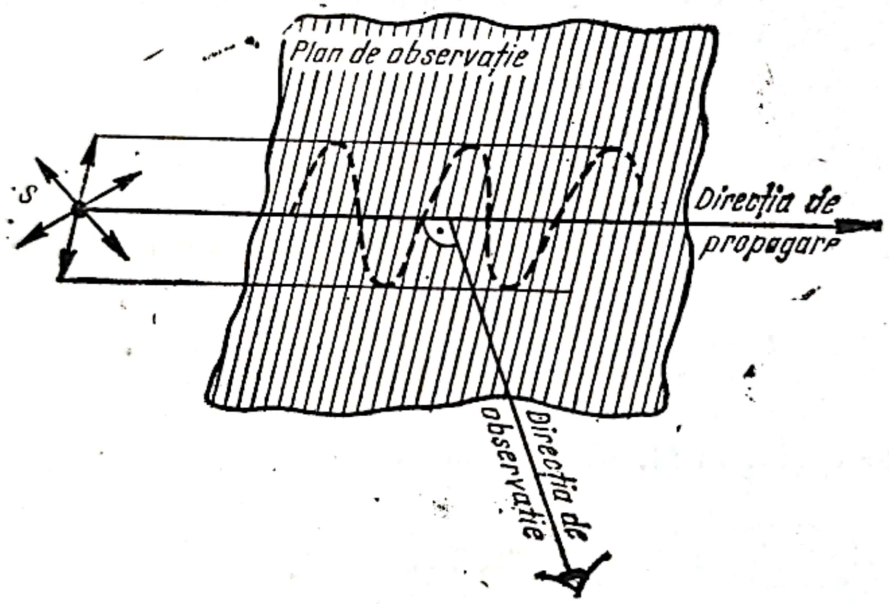


Fig. 4.7.

refracții succesive, la trecerea prin anumite cristale, sau cu ajutorul lamelor polaroid [1], [8], [20].

Lumina polarizată plan se mai poate obține, observînd dintr-o poziție laterală un fascicul de lumină obișnuită difuzată într-un mediu transparent (fig. 4.7). În acest caz vor fi observate numai acele componente ale vectorului luminos care se proiectează în planul care conține direcția de propagare și este perpendicular pe direcția de observare. Acest procedeu stă la baza unei noi tehnici fotoelastice de analiza stării spațiale de tensiune.

4.1.5. TRANSMITEREA LUMINII PRIN MEDII ANIZOTROPE

În mediile transparente izotrope, lumina se propagă în toate direcțiile cu aceeași viteză, determinată de densitatea mediului. Cînd lumina obișnuită întîlnește prin incidență normală un mediu transparent anizotrop

(cum ar fi o lamă de mică), vectorul luminos se descompune în două componente perpendiculare, polarizate plan. Acest fenomen este cunoscut sub numele de dublă refracţie sau birefringenţă. Cele două componente polarizate plan traversează lama transparentă cu viteze diferite, invers proporţionale cu indicii de refracţie pe direcţiile respective

$$v_1 = \frac{c}{n_1} \quad \text{şi} \quad v_2 = \frac{c}{n_2}$$

astfel că la ieşire, potrivit relaţiei (4.13), între cele două componente va exista o diferenţă de fază liniară

$$\delta = \varphi \frac{\lambda}{2\pi}. \tag{4.15}$$

Diferenţa unghiulară de fază corespunzătoare, poate fi exprimată cu ajutorul relaţiei (4.8) astfel

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2 = \frac{2\pi}{T}(t_1 - t_2) \tag{4.16}$$

unde t_1 şi t_2 sînt timpii în care cele două componente traversează lama de grosime h

$$t_1 = \frac{h}{v_1} = \frac{h}{c} n_1 \quad \text{şi} \quad t_2 = \frac{h}{v_2} = \frac{h}{c} n_2.$$

Înlocuind pe t_1 şi t_2 în (4.16) şi ţinînd seama de (4.7) se obţine

$$\varphi = \frac{2\pi h}{\lambda}(n_1 - n_2). \tag{4.17}$$

Înlocuind pe (4.17) în (4.15), diferenţa de fază liniară este dată de relaţia

$$\delta = h(n_1 - n_2). \tag{4.18}$$

Din relaţia (4.17) rezultă că defazajul produs între cele două componente depinde atît de grosimea lamei cît şi de lungimea de undă a luminii folosite.

Pentru obţinerea luminii polarizate circular este necesar să se realizeze o întîrziere de fază liniară egală cu $\lambda/4$. În fotoelasticitate această întîrziere se obţine cu ajutorul unor elemente optice numite lame sfert de undă. Lamele sfert de undă sînt confecţionate dintr-un material anizotrop birefringent, avînd grosimea astfel calculată pentru a produce între cele două componente, în cazul unei anumite lungimi de undă a luminii folosite, un defazaj egal cu $\lambda/4$.

Scanned with OKEN Scanner

Fenomenul de birefringenţă a fost observat de Brewster (1816) la unele materiale izotrope cum ar fi celuloidul, sticla, plexiglasul etc., atunci cînd sînt supuse unei stări de tensiune. În acest caz, fenomenul poartă numele de birefringenţă accidentală, iar materialele se numesc optic active.

4.2. OPTICA POLARISCOPULUI

4.2.1. POLAROIZI

Polaroizii plani sînt elemente optice care permit transmiterea acelor componente ale vibraţiei luminoase care sînt orientate după o anumită direcţie, numită axa polaroidului. Cînd lumina trece printr-un polaroid plan, acesta absoarbe componenta vectorului luminos perpendiculară pe axa polaroidului, lăsînd să treacă componenta paralelă cu axa polaroidului (fig. 4.8). În felul acesta, la ieşirea din polaroid lumina este polarizată în plane paralele cu planul format de axa polaroidului şi direcţia de propagare.

Pentru obţinerea luminii polarizate plan se folosesc diferite dispozitive optice [8], [20]. Astfel primele lame polaroid au fost obţinute prin aranjarea unor cristale de calcit sub forma aşa numitor *nicoli*. La trecerea luminii prin aceste lame se produce fenomenul de dublă refracţie. Cristalele de calcit sînt astfel orientate încît să producă reflexia totală a uneia din cele două componente polarizate plan, lăsînd pe cealaltă să treacă liber. Lamele polaroid au mai fost obţinute şi din cristale de turmalină. Aceste cristale prezintă, de asemenea, fenomenul de birefringenţă la trecerea

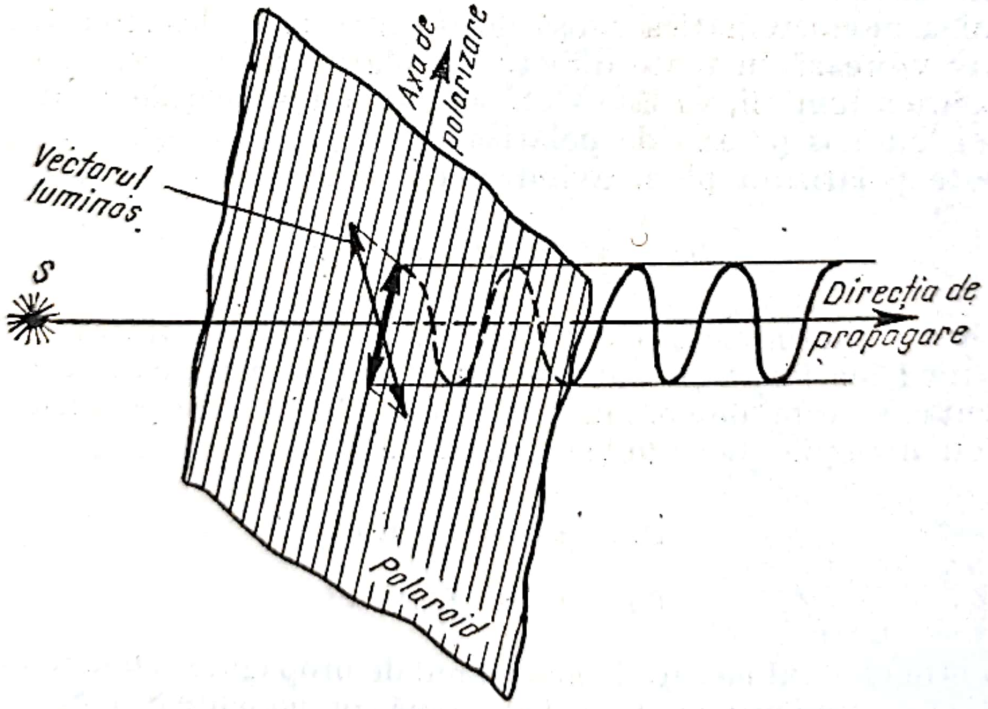


Fig. 4.8.

luminii, avînd în plus şi proprietatea de a absorbi una din cele două componente, astfel că la ieşire se obţine o singură componentă polarizată plan. Lamele polaroid obţinute din cristale, deşi nu au dimensiuni mari, se mai folosesc şi în prezent deoarece realizează o polarizare foarte bună a lu-

Scanned with OKEN Scanner

minii. Pentru obținerea luminii polarizate plan, în polariscoapele moderne, se folosesc polaroizii laminați. În acest caz polaroidul se obține dintr-o peliculă subțire de polivinil-alcool, laminată la cald și fixată pe un suport din butirat acetat de celuloză. După laminare, pelicula de polivinil alcool este colorată cu o cerneală săracă în iodine. Cantitatea de iodine absorbită de pelicula de polivinil alcool determină procentul de lumină care se transmite prin polaroid. Acest tip de polaroid realizează o polarizare aproape totală a luminii și se poate obține cu dimensiuni mari la un preț de cost scăzut.

4.2.2. POLARISCOPUL PLAN

Polariscopul plan este cel mai simplu dispozitiv optic care utilizează lumina polarizată plan. Un polariscop plan se compune dintr-o sursă de lumină monocromatică și două lame polarizoare (fig. 4.9). Lama polarizoare care este așezată în apropierea sursei de lumină poartă numele de polarizor, iar cealaltă de analizor. Axele optice ale polarizorului și analizorului sînt orientate pe direcții perpendiculare. Ca urmare, lumina polarizată de polarizor nu va traversa analizorul, observîndu-se un cîmp întunecat.

Pentru studiul stării de tensiune pe cale fotoelastică, modelul confecționat dintr-un material optic activ este introdus în stare tensionată între polarizor și analizor. Efectul fotoelastic produs în acest caz se urmărește prin analizor.

Lumina monocromatică emisă de sursa Q, este alcătuită din componente care vibrează în toate direcțiile. Polarizorul P, așezat pe direcția de propagare a luminii, va lăsa să treacă numai proiecțiile componentelor vectorului luminos pe axa de polarizare, astfel că la ieșire din polarizor lumina este polarizată plan, avînd componentele

$$S_x = a \sin pt, \quad S_y = 0 \tag{4.19}$$

unde a este amplitudinea, p pulsația și t timpul. La intrarea în modelul M (care fiind tensionat prezintă fenomenul de birefringență accidentală), componenta S_x este descompusă pe două direcții perpendiculare care coincid cu direcțiile tensiunilor principale

$$\begin{aligned} S_1 &= a \cos \alpha \cdot \sin pt \\ S_2 &= a \sin \alpha \cdot \sin pt \end{aligned} \tag{4.20}$$

în care α este unghiul pe care-l face planul de propagare a undei luminoase cu direcția tensiunii principale σ_1. Cele două componente S_1 și S_2 se propagă prin model cu viteze diferite, astfel că la ieșire nu vor mai fi în fază

$$\begin{aligned} S_1' &= a \cos \alpha \cdot \sin p\,(t - t_1) \\ S_2' &= a \sin \alpha \cdot \sin p\,(t - t_2) \end{aligned} \tag{4.21}$$

Scanned with OKEN Scanner

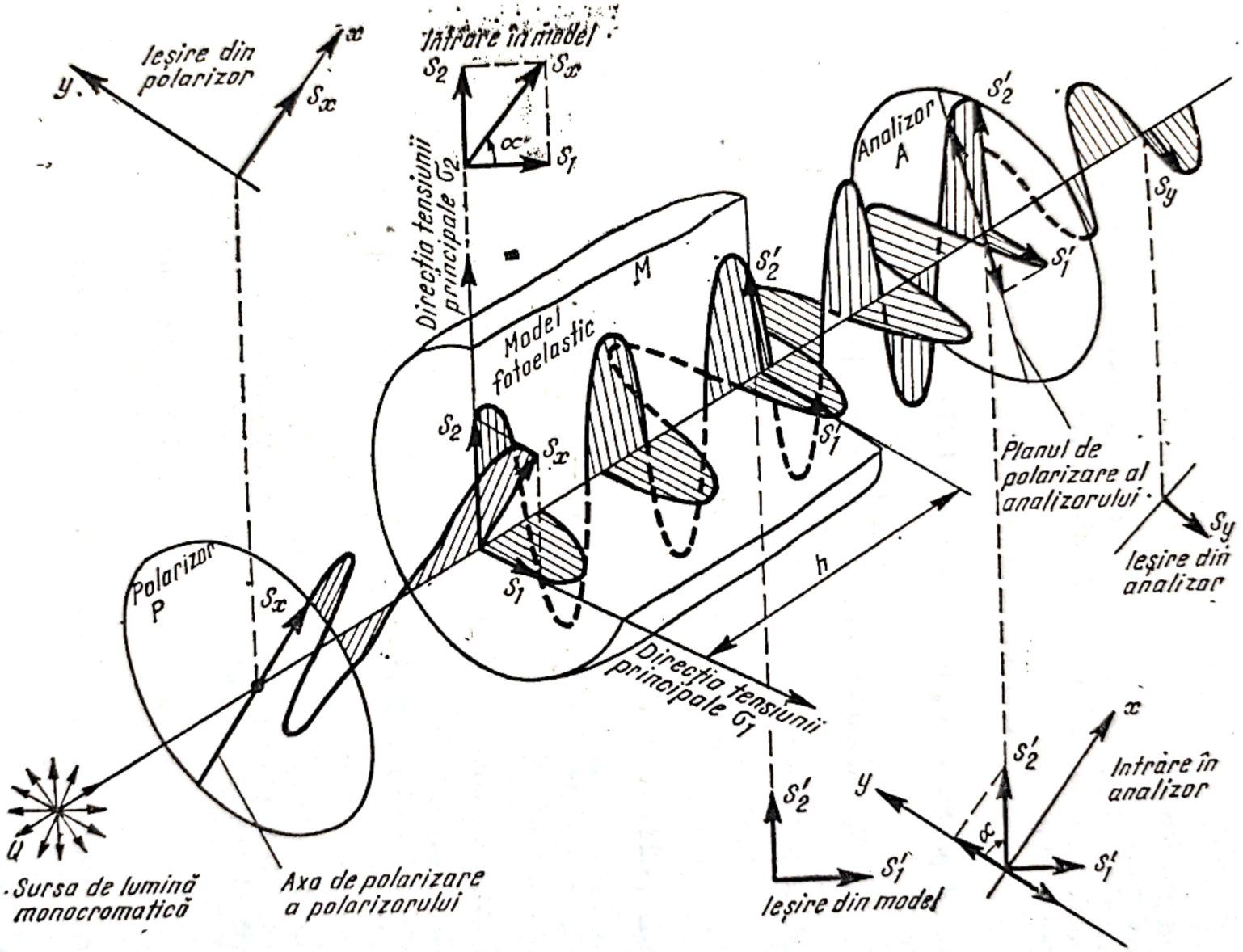

Ieșire din polarizor
Intrare în model
Direcția tensiunii principale σ_2
Model fotoelastic
M
Analizor A
Planul de polarizare al analizorului
Ieșire din analizor
Polarizor P
h
Direcția tensiunii principale σ_1
Sursa de lumină monocromatică
Axa de polarizare a polarizorului
Ieșire din model
Intrare în analizor

Fig. 4.9.

unde t_1 și t_2 sînt timpii de propagare prin model ai celor două componente și au valorile

$$t_1 = \frac{h}{v_1} \quad \text{și} \quad t_2 = \frac{h}{v_2} \tag{4.22}$$

h fiind grosimea modelului, iar v_1 și v_2 vitezele de propagare pe cele două direcții.

Analizorul A, fiind așezat cu axa optică perpendiculară pe cea a polarizorului, va face ca lumina să aibă următoarele componente la ieșirea din polariscop

$$S_x = 0, \quad S_y = S'_1 \sin\alpha - S'_2 \cos\alpha. \tag{4.23}$$

Înlocuind pe S'_1 și S'_2 cu expresiile (4.21), după unele transformări se obține

$$S_y = a \sin 2\alpha \cdot \sin p \frac{t_2 - t_1}{2} \cdot \cos p \left(t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right). \tag{4.24}$$

Notînd amplitudinea cu

$$A = a \sin 2\alpha \cdot \sin p \frac{t_2 - t_1}{2} \tag{4.25}$$

expresia (4.24) se poate scrie

$$S_y = A \cos p \left(t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right). \tag{4.26}$$

După cum se cunoaște din optică [1], intensitatea luminii este

$$I = 2A^2 = 2 \left(a \sin 2\alpha \cdot \sin p \frac{t_2 - t_1}{2} \right)^2. \tag{4.27}$$

Cînd intensitatea luminii este zero, se obține extincția totală și prin analizor se pot observa puncte și franje întunecate. Extincția totală apare potrivit (4.27), pentru una din următoarele condiții:

$$\text{a)} \quad \sin 2\alpha = 0, \qquad \text{adică} \qquad 2\alpha = n\pi$$

unde $n = 0, 1, 2, \ldots$, sau $\alpha = \frac{n\pi}{2}$.

Un interes deosebit îl prezintă cazul

$$\alpha = 0 \quad \text{și} \quad \alpha = \frac{\pi}{2} \tag{4.28}$$

Scanned with OKEN Scanner

adică atunci cînd una din direcţiile tensiunilor principale este paralelă şi cealaltă este perpendiculară pe planul de polarizare al polarizorului.

$$b)\quad p\frac{t_2 - t_1}{2} = k\pi, \qquad \text{unde } k = 0, 1, 2, \ldots$$

Deoarece pt_1 şi pt_2 sînt fazele unghiulare ale celor două componente care traversează modelul, diferenţa $pt_2 - pt_1 = \varphi$, reprezintă diferenţa unghiulară de fază între aceste două componente la ieşirea din model. Cu alte cuvinte,

$$\frac{\varphi}{2} = k\pi \quad \text{sau} \quad \frac{\varphi}{2\pi} = k.$$

Ţinînd seama de (4.13) se obţine

$$k = \frac{\delta}{\lambda} \quad \text{sau} \quad \delta = k\lambda. \tag{4.29}$$

Rezultă deci că extincţia totală mai apare atunci cînd întîrzierea relativă lineară δ, este un multiplu întreg de lungimi de undă.

4.2.3. POLARISCOPUL CIRCULAR

Polariscopul circular este un dispozitiv optic cu ajutorul căruia lumina monocromatică este polarizată circular. Un astfel de polariscop este alcătuit dintr-o sursă de lumină monocromatică Q, un polarizor P, două lame sfert de undă L_1 şi L_2 şi un analizor A (fig. 4.10).

După cum s-a mai arătat, lamele sfert de undă sînt confecţionate din materiale anizotrope care prezintă fenomenul de birefringenţă. Grosimea lamelor este aleasă corespunzător lungimii de undă a luminii folosite. La ieşirea din lama sfert de undă, între cele două componente există o diferenţă de fază lineară egală cu $\lambda/4$. În polariscopul circular, în mod obişnuit, polarizorul şi analizorul se aşează cu axele optice perpendiculare între ele, iar lamele sfert de undă cu axele optice orientate la 45° faţă de axa optică a polarizorului, dar perpendiculare între ele.

La ieşirea din polarizor, componentele vectorului luminos vor fi

$$S_x = a \sin pt, \quad S_y = 0. \tag{4.30}$$

La intrarea în prima lamă sfert de undă componenta S_x se descompune după direcţiile 1 şi 2

$$\begin{aligned} U_1 &= a \sin pt \cdot \cos 45° = b \sin pt \\ U_2 &= a \sin pt \cdot \sin 45° = b \sin pt, \end{aligned} \tag{4.31}$$

unde $b = \dfrac{a}{\sqrt{2}}$.

Scanned with OKEN Scanner

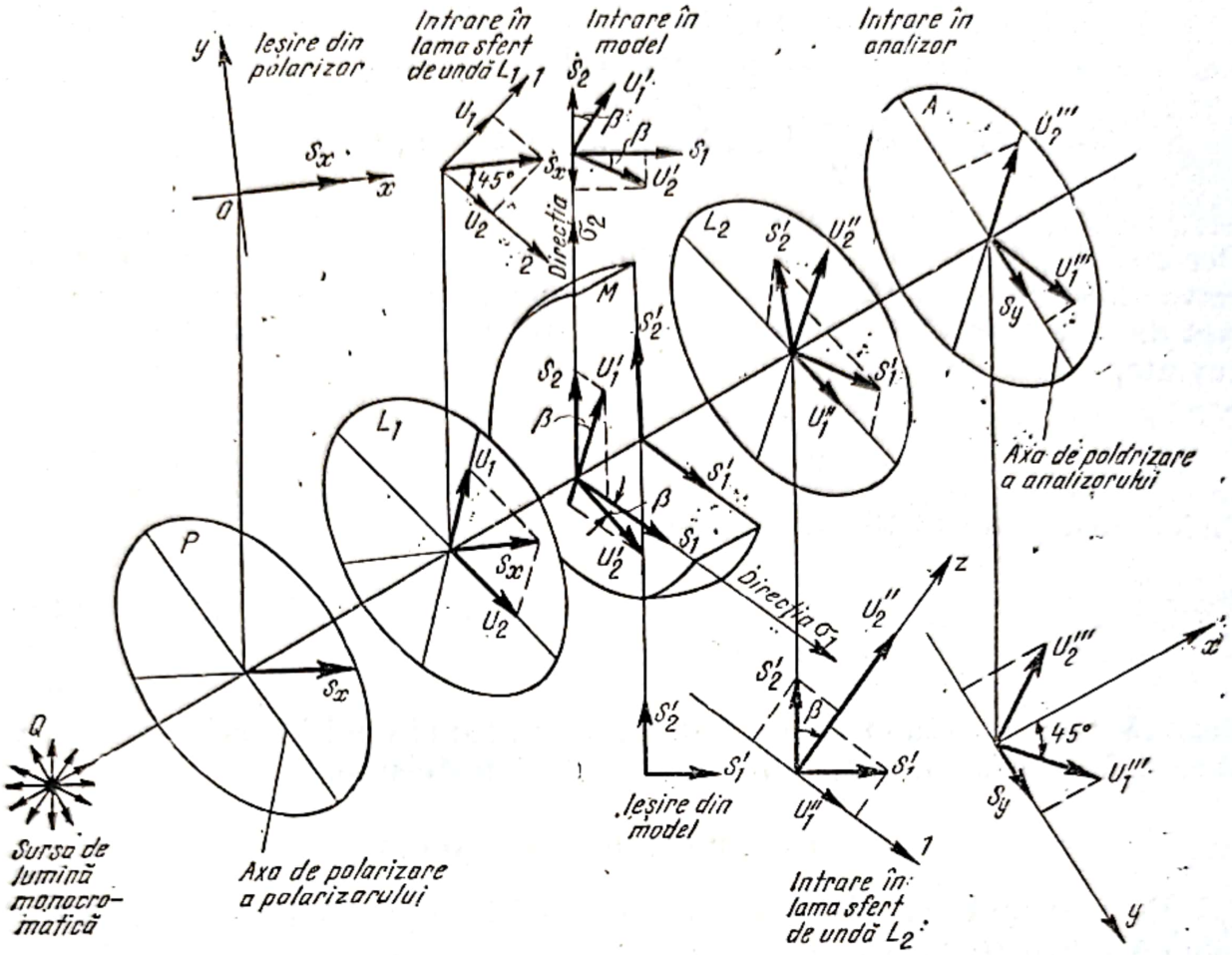


Fig. 4.10.

La ieşirea din prima lamă sfert de undă între cele două componente rezultă o diferenţă unghiulară de fază $\pi/2$

$$U_1' = b \sin\left(pt + \frac{\pi}{2}\right) = b \cos pt$$

$$U_2' = b \sin pt. \tag{4.32}$$

Expresiile (4.32) reprezintă ecuaţiile parametrice ale unui cerc, ceea ce arată că lumina este polarizată circular. Prin urmare, prima lamă sfert de undă are rolul de a converti lumina polarizată plan în lumină polarizată circular.

Întîlnind modelul fotoelastic solicitat, cele două componente U_1' şi U_2' se descompun după direcţiile tensiunilor principale σ_1 şi σ_2, care fac unghiul β cu direcţiile lamei sfert de undă.

Expresiile componentelor după cele două direcţii principale vor fi

$$S_1 = U_2' \cos\beta + U_1' \sin\beta$$

$$S_2 = U_1' \cos\beta - U_2' \sin\beta. \tag{4.33}$$

Scanned with OKEN Scanner

Substituind pe U_1' și U_2' din (4.32), după unele transformări se obține

$$S_1' = b \sin (pt + \beta)$$
$$S_2' = b \cos (pt + \beta). \tag{4.34}$$

Cele două componente traversează modelul cu viteze diferite, astfel că la ieșire, între ele va exista o diferență de fază

$$S_1' = b \sin [p (t - t_1) + \beta]$$
$$S_2' = b \cos [p (t - t_2) + \beta]. \tag{4.35}$$

Întîlnind cea de a doua lamă sfert de undă care are rolul de a transforma lumina polarizată circular în lumină polarizată plan, componentele S_1' și S_2' se descompun după două direcții

$$U_1'' = S_1' \cos \beta - S_2' \sin \beta$$
$$U_2'' = S_1' \sin \beta + S_2' \cos \beta. \tag{4.36}$$

La ieșirea din lama sfert de undă, între cele două componente va exista o diferență unghiulară de fază de $\pi/2$. Ținînd seama de această întîrzierea și de faptul că axele celor două lame sfert de undă sînt perpendiculare între ele, făcînd calculele se obține

$$U_1''' = b \cos [p (t - t_2) + \beta] \cos \beta + b \sin [p (t - t_1) + \beta] \sin \beta$$
$$U_2''' = b \sin [p (t - t_2) + \beta] \sin \beta + b \cos [p (t - t_1) + \beta] \cos \beta. \tag{4.37}$$

La ieșirea din lama sfert de undă rezultă astfel două componente polarizate plan, situate în plane perpendiculare. Analizorul fiind așezat cu axa optică perpendiculară pe cea a polarizorului, componentele undei luminoase la ieșirea din analizor vor fi

$$S_x = 0, \quad S_y = \frac{1}{\sqrt{2}} (U_1''' - U_2'''). \tag{4.38}$$

Înlocuind și făcînd calculele se obține

$$S_y = a \sin p \frac{t_2 - t_1}{2} \cdot \sin \left[p \left(t - \frac{t_1 + t_2)}{2} \right) + 2\beta \right]. \tag{4.39}$$

Intensitatea luminii în analizor va fi

$$I = 2A^2 = 2a^2 \sin^2 p \frac{t_2 - t_1}{2}. \tag{4.40}$$

Scanned with OKEN Scanner

În acest caz există o singură condiţie de extincţie, asemănătoare cu condiţia (4.29). Cu alte cuvinte extincţia totală se obţine numai dacă întîrzierea relativă lineară δ este un multiplu întreg de lungimi de undă. După cum se observă în expresia (4.40), nu intervine unghiul β, care indică orientarea direcţiilor principale din model faţă de axele lamelor sfert de undă. Aceasta înseamnă că intensitatea luminii într-un punct, nu depinde de orientarea modelului în planul său.

În mod normal, în polariscopul circular elementele sînt orientate pentru obţinerea cîmpului întunecat. După cum se va arăta în cele ce urmează, pentru a creşte precizia determinărilor fotoelastice, de multe ori se utilizează şi analiza în cîmp luminat. Din (4.40) rezultă că iluminarea cîmpului observat prin analizor este maximă (cîmp luminat), cînd întîrzierea relativă liniară δ este un număr impar de jumătăţi de lungimi de undă

$$\delta = (2k\pi + 1)\frac{\lambda}{2}. \qquad (4.41)$$

În tabelul 4.1 se indică patru moduri de aranjare a elementelor optice ale polariscopului circular pentru obţinerea cîmpului întunecat sau luminat. Dintre acestea se recomandă primele două variante care au avantajul că elimină erorile introduse de imprecizia de execuţie a lamelor sfert de undă.

Tabelul 4.1

Modurile de aranjare ale elementelor polariscopului circular pentru obţinerea cîmpului întunecat sau luminat

Montajul	Poziţia axelor principale ale lamelor sfert de undă	Poziţia axelor de polarizare ale polarizorului şi analizorului	Felul cîmpului
1	Perpendiculare	Perpendiculare	Întunecat
2	Perpendiculare	Paralele	Luminat
3	Paralele	Perpendiculare	Luminat
4	Paralele	Paralele	Întunecat

Un exemplu de franje fotoelastice obţinute în cîmp întunecat şi în cîmp luminat este prezentat în fig. 4.11, a şi b.

4.2.4. IZOCLINE

Intensitatea luminii transmisă printr-un model examinat în polariscopul cu lumină polarizată plan este dată de relaţia (4.27). După cum s-a mai arătat, una din condiţiile pentru obţinerea extincţiei totale este ca $\sin 2\alpha = 0$, adică $\alpha = 0°$ sau $\alpha = 90°$. Rezultă deci că axele de polarizare ale polarizorului şi analizorului sînt paralele cu direcţiile tensiunilor principale din model. În acest caz, pe suprafaţa modelului vor fi observate o serie de *franje care reprezintă locul geometric al punctelor în care tensiunile principale sînt paralele cu axele polarizorului şi analizorului. Aceste franje*

Scanned with OKEN Scanner

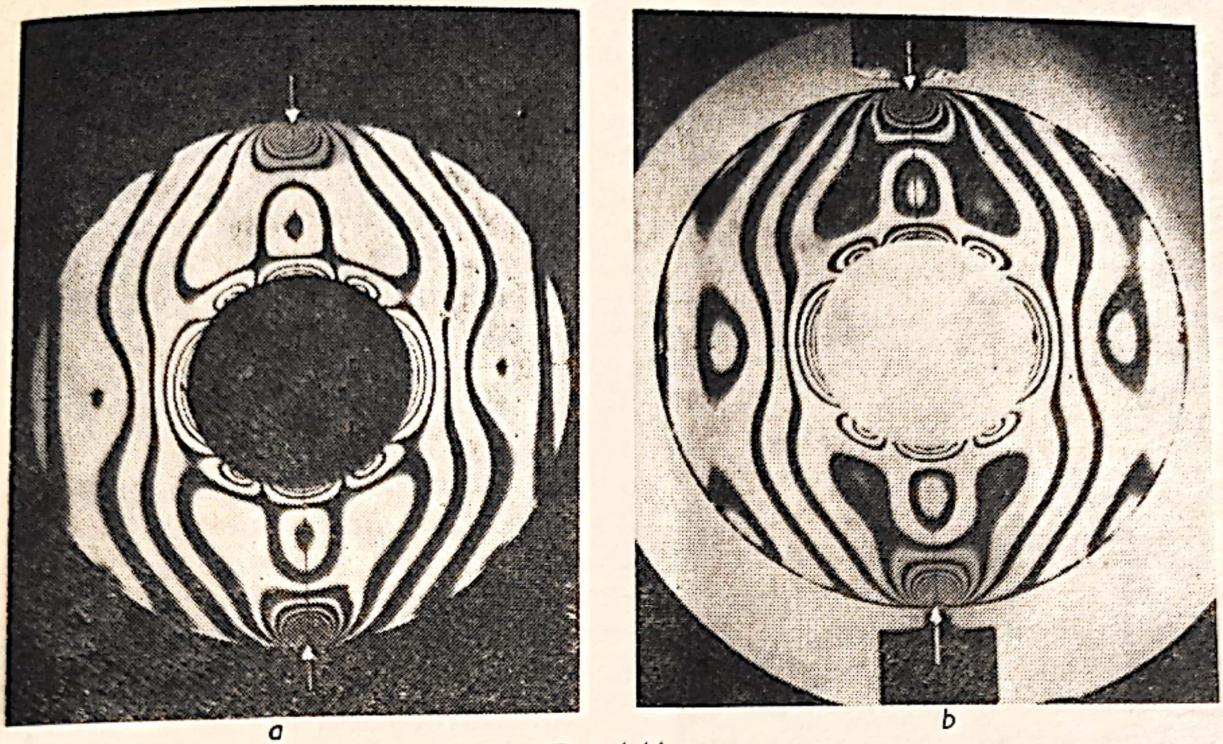


Fig. 4.11.

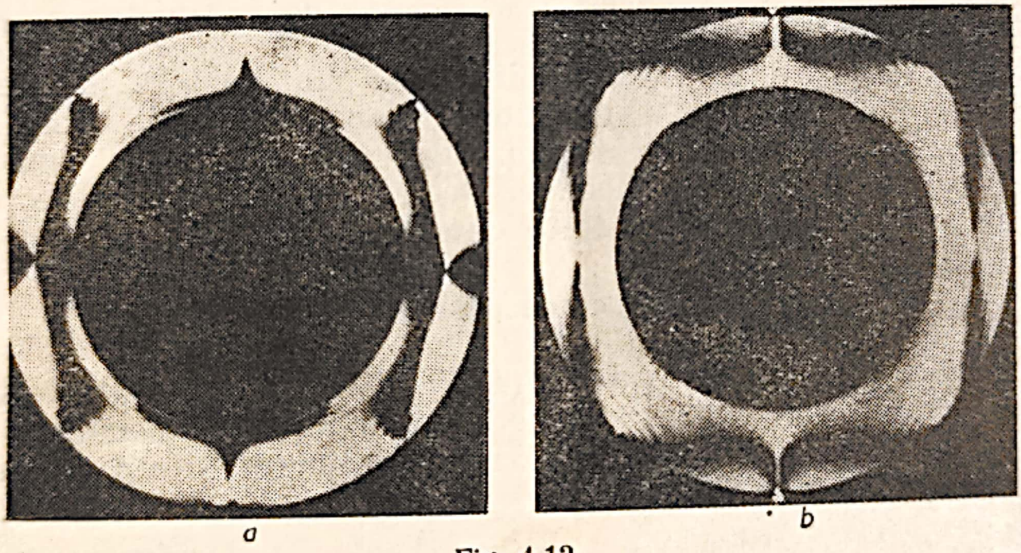


Fig. 4.12.

poartă numele de izocline. Dacă polarizorul și analizorul se rotesc, menținîndu-se axele lor perpendiculare între ele, se poate obține o nouă familie de izocline corespunzătoare unui nou parametru α_i. În fig. 4.12, a și b, sînt prezentate izoclinele de 0° și 45°, pentru un inel comprimat diametral.

Pentru identificarea izoclinelor obținute în polariscopul plan, este necesar să se țină seama de următoarele proprietăți pe care acestea le prezintă :

a) izoclinele nu se intersectează între ele decît cu excepția punctelor izotrope. Prin puncte izotrope (singulare) se înțeleg punctele în care $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$. În aceste puncte toate direcțiile sînt direcții principale;

b) o izoclină de un parametru oarecare α_i intersectează un contur neîncărcat într-un punct în care tangenta la curbă (izoclină), face cu axa x același unghi α (fig. 4.13);

c) dacă modelul prezintă o porțiune de contur rectilinie și neîncărcată, aceasta este o izoclină, deoarece reprezintă o linie în lungul căreia tensiunile principale au aceeași direcție;

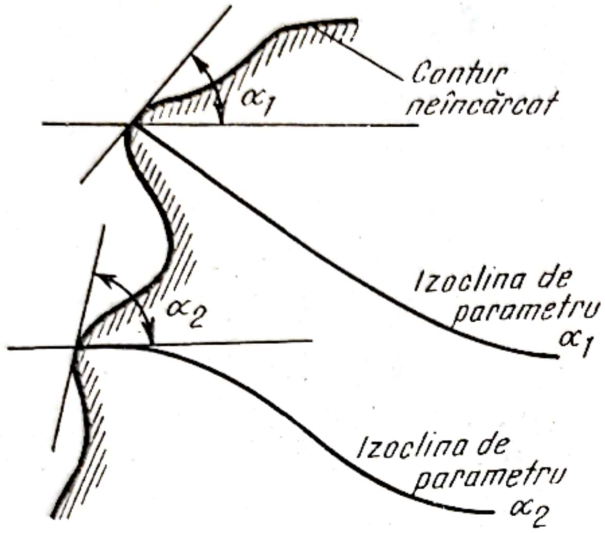


Fig. 4.13.

d) dacă modelul prezintă axe de simetrie, aceste axe trebuie să coincidă cu izoclina de un anumit parametru;

e) dacă modelul prezintă puncte izotrope, toate izoclinele trec prin aceste puncte;

f) izoclinele corespunzătoare tuturor parametrilor trec prin punctele în care sînt aplicate sarcinile concentrate;

g) deoarece într-un punct există două direcții principale perpendiculare, rezultă că o izoclină de un parametru α_i este identică cu izoclina de parametru $\alpha_i + \frac{\pi}{2}$.

În studiile de fotoelasticitate izoclinele sînt folosite printre altele pentru trasarea traiectoriilor tensiunilor principale. Traiectoriile tensiunilor principale poartă numele de izostatice și sînt curbe tangente în fiecare punct la direcțiile principale. Deoarece există două direcții principale, prin fiecare punct vor trece cîte două izostatice ortogonale.

4.2.5. IZOCROMATE

Revenind din nou la expresia (4.27), așa cum s-a arătat, extincția totală a luminii se mai poate obține atunci cînd este satisfăcută relația (4.29), adică atunci cînd întîrzierea relativă liniară δ este un multiplu întreg de lungimi de undă

$$\delta = k\lambda.$$

De asemenea, așa cum rezultă din (4.40), se obține o intensitate maximă a luminii transmise (cîmp luminat), atunci cînd întîrzierea relativă liniară δ este un multiplu impar de jumătăți de lungimi de undă

$$\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Punctele din model în care este satisfăcută relația (4.29) se găsesc pe benzi continu întunecate sau într-o zonă întunecată. Cînd încărcarea modelului crește, multiplul k din relația (4.29) va crește și pe suprafața

Scanned with OKEN Scanner

modelului vor apărea noi benzi întunecate. În mod asemănător, potrivit relației (4.41), pe suprafața modelului apar benzi sau zone luminoase atunci cînd multiplul k crește prin creșterea încărcării. Dacă modelul este examinat în lumină albă, benzile sau zonele întunecate apar ca benzi sau zone colorate cu aceeași culoare, motiv pentru care aceste benzi poartă numele de izocromate. Așa cum se va arăta, izocromatele corespund punctelor din model în care diferența tensiunilor principale $\sigma_1 - \sigma_2 = \text{ct.}$ Prin urmare, *izocromatele mai pot fi definite ca locul geometric al punctelor în care diferența tensiunilor principale este constantă.* Deoarece tensiunea tangențială maximă dintr-un punct, în cazul stării plane de solicitare, este egală cu jumătate din diferența tensiunilor principale normale din acel punct, izocromatele mai pot fi interpretate ca *locul geometric al punctelor în care tensiunea tangențială maximă este constantă.*

În polariscopul plan cele două familii de curbe (izoclinele și izocromatele) se suprapun și sînt greu de separat.

În cazul polariscopului cu lumină polarizată circular, extincția totală este dată de o singură condiție asemănătoare cu (4.29) și, prin urmare, în acest polariscop se obțin numai izocromatele. Într-un polariscop cu lumină polarizată circular se pot obține izocromatele atît în cîmp întunecat cît și în cîmp luminat. Izocromatele obținute în cîmp întunecat corespund unui număr par al multiplului k (ordin de bandă), pe cînd cele obținute în cîmp luminat corespund la jumătăți ale ordinului de bandă. Pentru determinarea stării de tensiune din model este suficientă una din aceste familii de izocromate. De multe ori se folosesc ambele familii de izocromate pentru a spori precizia determinărilor fotoelastice.

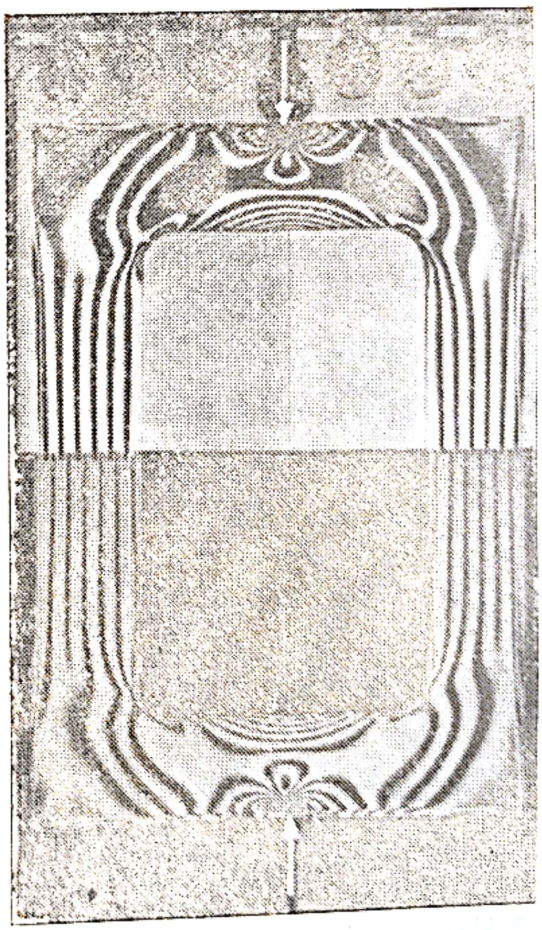


Fig. 4.14.

În figura 4.14 se prezintă izocromatele obținute în cîmp întunecat și luminat într-o aplicație practică de fotoelasticitate. Cele două familii de curbe (izoclinele și izocromatele) se deosebesc unele de celelalte prin următoarele:

a) izoclinele depind de înclinarea axelor polaroizilor, în timp ce izocromatele depind de natura materialului fotoelastic, de natura luminii și grosimea modelului;

b) cînd polaroizii se rotesc, izocromatele rămîn fixe, iar izoclinele își schimbă poziția;

c) cînd încărcarea variază se modifică numărul izocromatelor;

d) în lumină albă izoclinele sînt negre iar izocromatele sînt colorate.

4.3. TEORIA FOTOELASTICITĂȚII

4.3.1. LEGILE ELASTICITĂȚII

Determinarea stării de tensiune dintr-o piesă cu ajutorul fotoelasticității se bazează pe apariția fenomenului de birefringență accidentală la materialele transparente, optic active, atunci cînd sînt supuse unei stări de tensiune. Pentru aceasta, din materialul fotoelastic se execută un model, la scară, care apoi este încărcat. În stare netensionată materialul modelului este izotrop din punct de vedere optic, prezentînd în toate direcțiile același indice de refracție n_0. Dacă modelul este solicitat de un sistem de forțe exterioare, va lua naștere o stare de tensiune care face ca materialul să devină birefringent și să-și modifice proprietățile optice. *Maxwell a arătat că axele optice principale (axele principale de birefringență) dintr-un punct al modelului solicitat, coincid cu direcțiile tensiunilor principale din acel punct.* Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de legea calitativă a fotoelasticității. Notînd cu n_1 și n_2 indicii de refracție în lungul direcțiilor principale și cu n_0 indicele de refracție al materialului în stare netensionată, Maxwell a stabilit în 1853 relația de legătură între starea de tensiune din model și efectul optic produs de aceasta

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1\sigma_1 - C_2\sigma_2 \\ n_2 - n_0 &= C_1\sigma_2 - C_2\sigma_1. \end{aligned} \tag{4.42}$$

Relațiile (4.42) sînt cunoscute sub *denumirea de legea cantitativă a fotoelasticității sau legea efortului optic.* Coeficienții C_1 și C_2 din aceste relații poartă numele de coeficienți de efort optic.

Scăzînd cele două relații (4.42) se obține

$$n_1 - n_2 = (C_1 + C_2)(\sigma_1 - \sigma_2)$$

de unde, legea efortului optic poate fi scrisă astfel

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n_1 - n_2}{C_\sigma} \tag{4.43}$$

unde $C_\sigma = C_1 + C_2$ poartă numele de *coeficient de efort optic relativ.*

Din expresia (4.43) rezultă că diferența tensiunilor principale $\sigma_1 - \sigma_2$ poate fi determinată în orice punct al modelului dacă se cunosc indicii de refracție ai materialului pe cele două direcții principale și coeficientul de efort optic relativ. Această metodă de determinare este precisă dar foarte greoaie și de aceea nu este folosită în cercetările experimentale de fotoelasticitate.

Ținînd seama de (4.43), expresia (4.18) mai poate fi scrisă astfel

$$\delta = C_\sigma h(\sigma_1 - \sigma_2). \tag{4.44}$$

Scanned with OKEN Scanner

4.3.2. CONSTANTĂ FOTOELASTICĂ

După cum s-a văzut, în polariscopul circular aranjat pentru cîmp întunecat, extincția totală se obține atunci cînd este satisfăcută condiția (4.29):

$$\delta = k\lambda.$$

Comparînd (4.44) cu (4.29) se obține:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k \frac{\lambda}{C_\sigma h} = k\ \sigma_0 \tag{4.45}$$

unde $\sigma_0 = \frac{\lambda}{C_\sigma h}$ poartă numele de constantă fotoelastică a modelului și se exprimă în daN/cm² · franjă, iar k reprezintă ordinul de bandă al franjei.

Din expresia (4.45) rezultă că diferența tensiunilor principale $\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{max}$ într-un punct din model, poate fi determinată cu ușurință dacă se cunoaște ordinul de bandă al franjei din punctul respectiv și constanta fotoelastică a modelului. După cum se va arăta în cele ce urmează, ordinul de bandă al franjei poate fi determinat cu precizie, destul de ușor, astfel că relația (4.45) stă la baza determinării stării de tensiune din modele plane cu ajutorul fotoelasticității.

Constanta fotoelastică σ_0 a modelului, măsoară sensibilitatea unui model fotoelastic de grosime h, reprezentînd *tensiunea necesară pentru a modifica ordinul de bandă dintr-un punct cu o unitate.* Pentru a compara sensibilitatea a două materiale fotoelastice s-a introdus noțiunea de *constantă fotoelastică a materialului*, independentă de grosime și definită astfel

$$\sigma_0' = h\sigma_0 = \frac{\lambda}{C_\sigma} \tag{4.46}$$

Constanta fotoelastică σ_0', a materialului, *reprezintă tensiunea necesară pentru a modifica ordinul de bandă cu o unitate într-un punct dintr-un model cu grosimea egală cu unitatea.*

În cazul unei legături liniare între tensiunile și deformațiile modelului, expresia (4.44) poate fi scrisă astfel

$$\delta = C_\varepsilon h(\varepsilon_1 - \varepsilon_\varepsilon) \tag{4.47}$$

unde C_ε poartă numele de coeficient de deformație optică relativă. Între C_σ și C_ε există următoarea relație de legătură

$$C_\varepsilon = \frac{C_\sigma E}{1 + \mu}. \tag{4.48}$$

Comparînd (4.47) cu (4.29) se obține

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = k \frac{\lambda}{C_\varepsilon h} = k\varepsilon_0 \tag{4.49}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde $\varepsilon_0 = \dfrac{\lambda}{C_\varepsilon\, h}$ poartă numele de *constantă fotoelastică de deformație a modelului* și se exprimă în cm/cm · franjă. Constanta fotoelastică de deformație a materialului, în acest caz se definește astfel

$$\varepsilon_0' = \varepsilon_0 h = \frac{\lambda}{C_\varepsilon}. \tag{4.50}$$

Între constantele ε_0 și σ_0 există următoarea relație

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0(1 + \mu)}{E}. \tag{4.51}$$

4.3.3. ETALONAREA FOTOELASTICĂ

Determinarea cantitativă a stării de tensiune dintr-un model fotoelastic este legată de cunoașterea constantei fotoelastice a modelului σ_0, care se determină experimental printr-o operație simplă de etalonare.

De multe ori caracteristicile optice și mecanice ale materialelor fotoelastice sînt indicate de firma producătoare. Experiența arată că aceste caracteristici variază foarte mult de la o șarjă la alta, pentru același tip de material. De asemenea, aceste proprietăți variază cu temperatura și se modifică considerabil în timp. De aceea, este necesar să se facă o etalonare a fiecărui material fotoelastic înainte de a fi folosit. În cazul cercetărilor fotoelastice care necesită un timp mai îndelungat de lucru se recomandă să se facă o etalonare de verificare chiar în timpul încercărilor.

Pentru etalonare, se utilizează mai multe metode, în funcție de sensibilitatea optică a materialului fotoelastic folosit. În general pentru etalonare se folosește o epruvetă de o anumită formă la care se cunoaște distribuția de eforturi produsă de un anumit mod de încărcare. Epruveta se încarcă treptat notîndu-se forța și ordinul de bandă corespunzător. Cu aceste perechi de valori se trasează curba de etalonare $P = f(k)$. Constanta fotoelastică σ_0 se determină făcînd media constantelor calculate pentru diferite valori ale lui P și k.

a) *Etalonarea fotoelastică la întindere.* Acest procedeu de etalonare este recomandat pentru materialele fotoelastice cu o sensibilitate optică relativ scăzută. Epruveta se confecționează din același material cu modelul, avînd grosimea egală cu cea a modelului. În fig. 4.15, a se prezintă forma și dimensiunile unei epruvete folosite pentru etalonarea unei plăci de *araldit* de tip *D*. În acest caz epruveta este prevăzută cu o umflătură pentru a permite vizualizarea izocromatelor și notarea ordinului de bandă.

Notînd cu b și h dimensiunile secțiunii epruvetei, tensiunile introduse de sarcina aplicată P vor fi

$$\sigma_1 = \frac{P}{bh} \quad \text{și} \quad \sigma_2 = 0. \tag{a}$$

Scanned with OKEN Scanner

Pe de altă parte, potrivit expresiei (4.45), se poate scrie

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = k\sigma_0 \qquad \text{(b)}$$

unde k este numărul maxim de izocromate care apar în zona epruvetei prevăzută cu umflătură. Numerotarea izocromatelor se face către axa

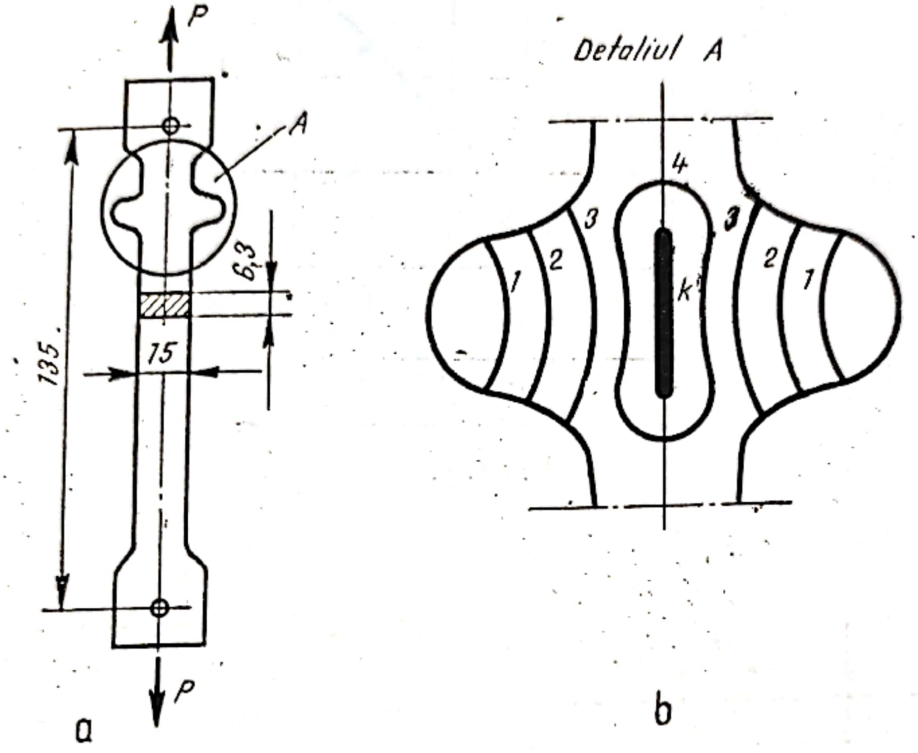


Fig. 4.15.

epruvetei. Încărcarea trebuie astfel realizată încît să se asigure o centrare cît mai bună a sarcinii aplicate. În acest caz izocromatele produse în zona prevăzută cu umflătură sînt simetrice față de axa epruvetei (fig. 4.15, b).

Comparînd relațiile (a) și (b) se obține

$$\sigma_0 = \frac{P}{kbh}.$$

Cu această expresie se calculează valoarea constantei fotoelastice a modelului. În fig. 4.16 se prezintă curba de etalonare obținută pe o epruvetă de *araldit D* cu secțiunea 6,3 × 15 mm².

b) *Etalonarea la încovoiere pură.* Este metoda cea mai utilizată pentru etalonarea materialelor fotoelastice cu sensibilitate optică medie și ridicată. Forma epruvetei cît și dispozitivul pentru realizarea solicitării de încovoiere pură sînt prezentate în fig. 4.17.

Pe porţiunea de bară solicitată la încovoiere pură, izocromatele apar sub forma unor linii paralele echidistante de o parte şi de alta a axei epruvetei (fig. 4.18). Franjele paralele şi echidistante arată că repar-

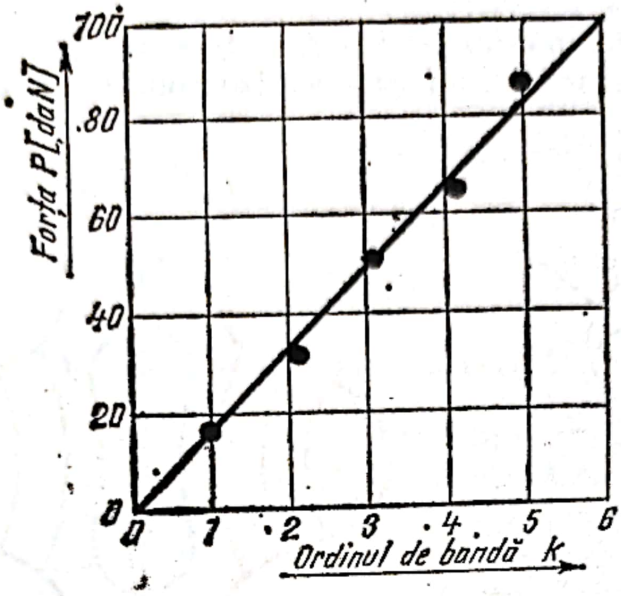


Fig. 4.16.

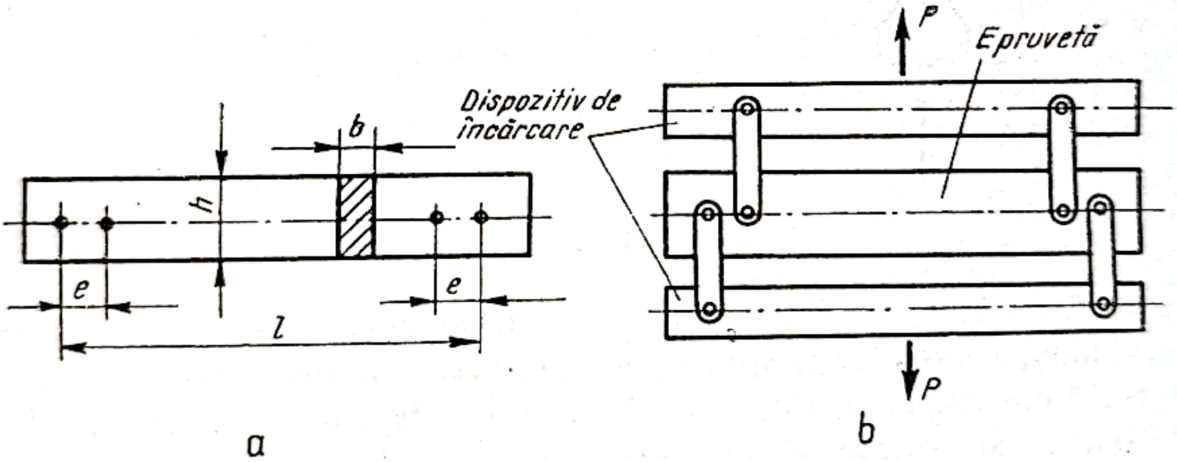


Fig. 4.17.

tizarea tensiunilor este aceeaşi în toate secţiunile, iar într-o secţiune tensiunile au o variaţie liniară dată de formula lui Navier.

Tensiunea maximă din epruvetă este

$$\sigma_{max} = \frac{Mi}{Wz} = \frac{3Pe}{bh^2}. \qquad (c)$$

Ţinînd seama de (4.45), rezultă

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = k\sigma_0. \qquad (d)$$

Scanned with OKEN Scanner

Comparînd relaţiile (c) şi (d) se obţine

$$\sigma_0 = \frac{3Pe}{kbh^2}.$$

Încărcarea epruvetei trebuie să se facă în acest caz astfel ca izocromata de un anumit ordin k, să fie tangentă la contur (atît la partea superioară cît şi la cea inferioară). În fig. 4.18 se arată modul de notare a izocromatelor şi distribuţia tensiunilor în secţiune.

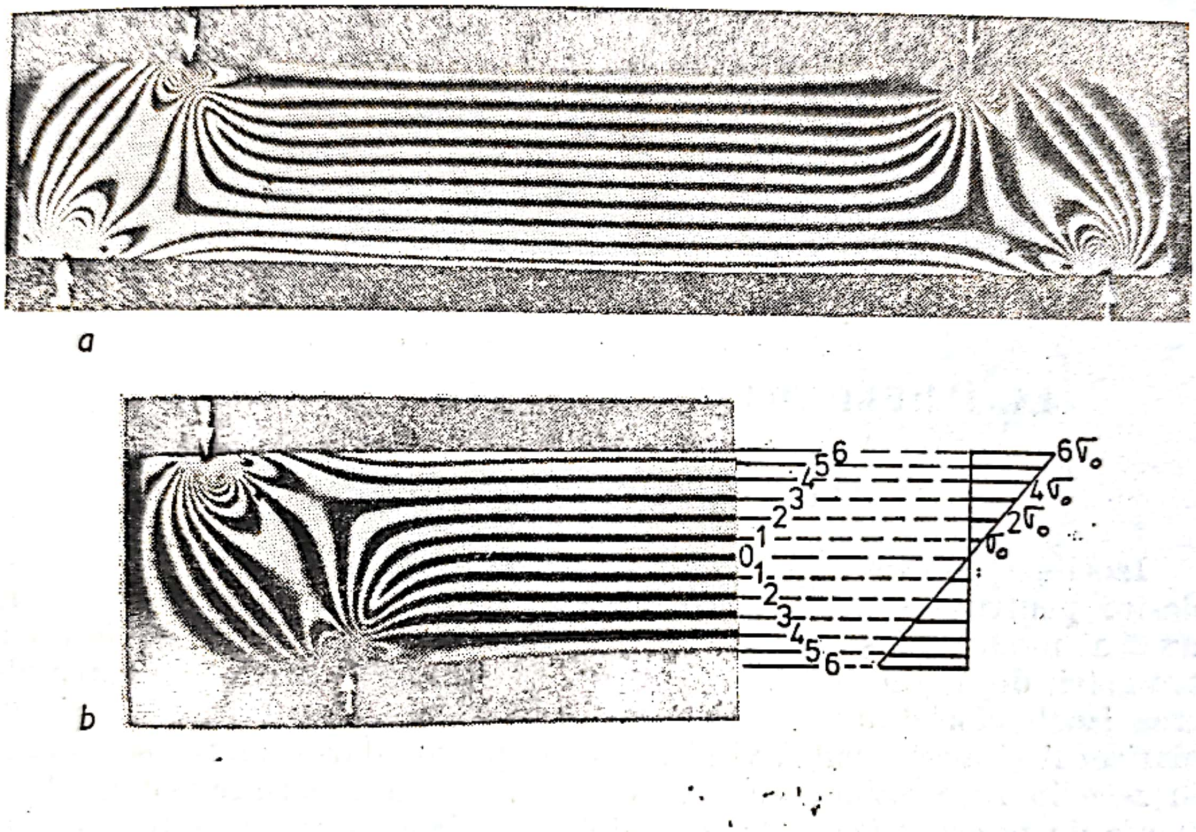


Fig. 4.18.

c) *Etalonarea cu disc comprimat axial.* Metodele de etalonare prezentate mai sus se referă la starea de tensiune după o singură direcţie. Etalonarea fotoelastică se poate face şi în cazul stării plane de tensiune folosind un disc comprimat diametral. Tensiunile principale în centrul discului, cunoscute din teoria elasticităţii, sînt

$$\sigma_1 = \frac{2P}{\pi Dt} \quad \text{şi} \quad \sigma_2 = -\frac{6P}{\pi Dt} \tag{e}$$

unde P este sarcina, D diametrul discului şi t grosimea (fig. 4.19, a). Cu ajutorul expresiilor (e) poate fi calculată diferenţa $\sigma_1 - \sigma_2$. Variind încărcarea P se determină proporţionalitatea dintre ordinul de bandă k şi $\sigma_1 - \sigma_2$, obţinîndu-se astfel curba de etalonare (fig. 4.19, b).

Scanned with OKEN Scanner

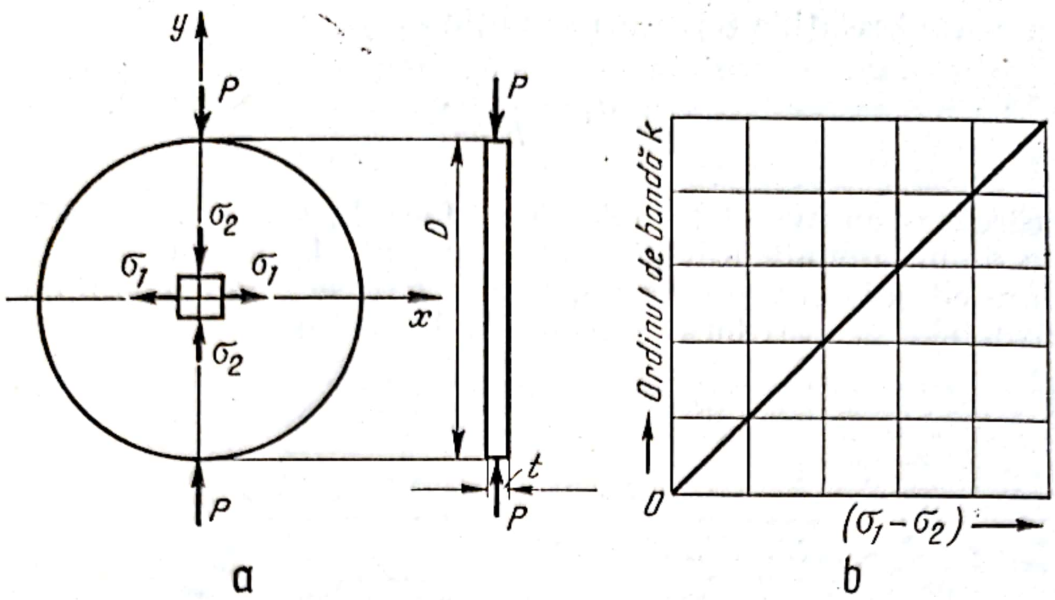


Fig. 4.19.

4.4. ÎNREGISTRAREA DATELOR FOTOELASTICE

4.4.1. ÎNREGISTRAREA IZOCLINELOR

Izoclinele obținute în polariscopul cu lumină polarizată plan sînt folosite pentru determinarea direcțiilor tensiunilor principale în orice punct al modelului și pentru trasarea izostaticelor. Izoclinele de diferiți parametri, de regulă sînt trasate pe hîrtie sau fotografiate. Pentru obținerea izoclinelor dintr-un anumit interval, de exemplu de la 0° la 90°, polarizorul și analizorul (avînd axele perpendiculare), se rotesc simultan din zece în zece grade sau din cinsprezece în cincisprezece grade, în funcție de precizia impusă determinărilor. Izoclinele obținute prin fotografiere de multe ori sînt confuze. Fiind greu de precizat, punctele prin care trec, în practică, se trasează prin puncte, pe hîrtie. În acest scop pe suprafața modelului se trasează o rețea fină rectangulară. Pe o bucată de hîrtie separat se desenează conturul modelului avînd trasată aceeași rețea de linii rectangulare. O placă subțire dintr-un material opac, avînd în mijloc o gaură cu diametrul de (1,5... 2) mm, se așază pe rînd cu gaura în dreptul fiecărui nod al rețelei de pe suprafața modelului. Se rotește simultan polarizorul și analizorul pînă cînd în nodul examinat se obține extincție totală. Se notează pe hîrtie în dreptul nodului respectiv unghiul cu care s-a rotit analizorul și polarizorul continuîndu-se operația și pentru celelalte noduri. Unind apoi punctele de același parametru se obține spectrul izoclinelor.

După cum s-a mai arătat, în polariscopul cu lumină polarizată plan, izoclinele se suprapun peste izocromate, astfel că cele două familii de curbe sînt greu de identificat. De aceea pentru a obține numai izoclinele se recomandă utilizarea unui model confecționat dintr-un material cu

Scanned with OKEN Scanner

sensibilitate optică scăzută cum este plexiglasul. Modelul se încarcă foarte puţin astfel ca să se obţină cel mult o izocromată. Variind încărcarea, izocromata îşi modifică poziţia, în timp ce izoclinele rămîn neschimbate, fiind astfel identificate cu uşurinţă. În fig. 4.20 se prezintă cîmpul izoclinelor obţinute pentru o şaibă comprimată diametral.

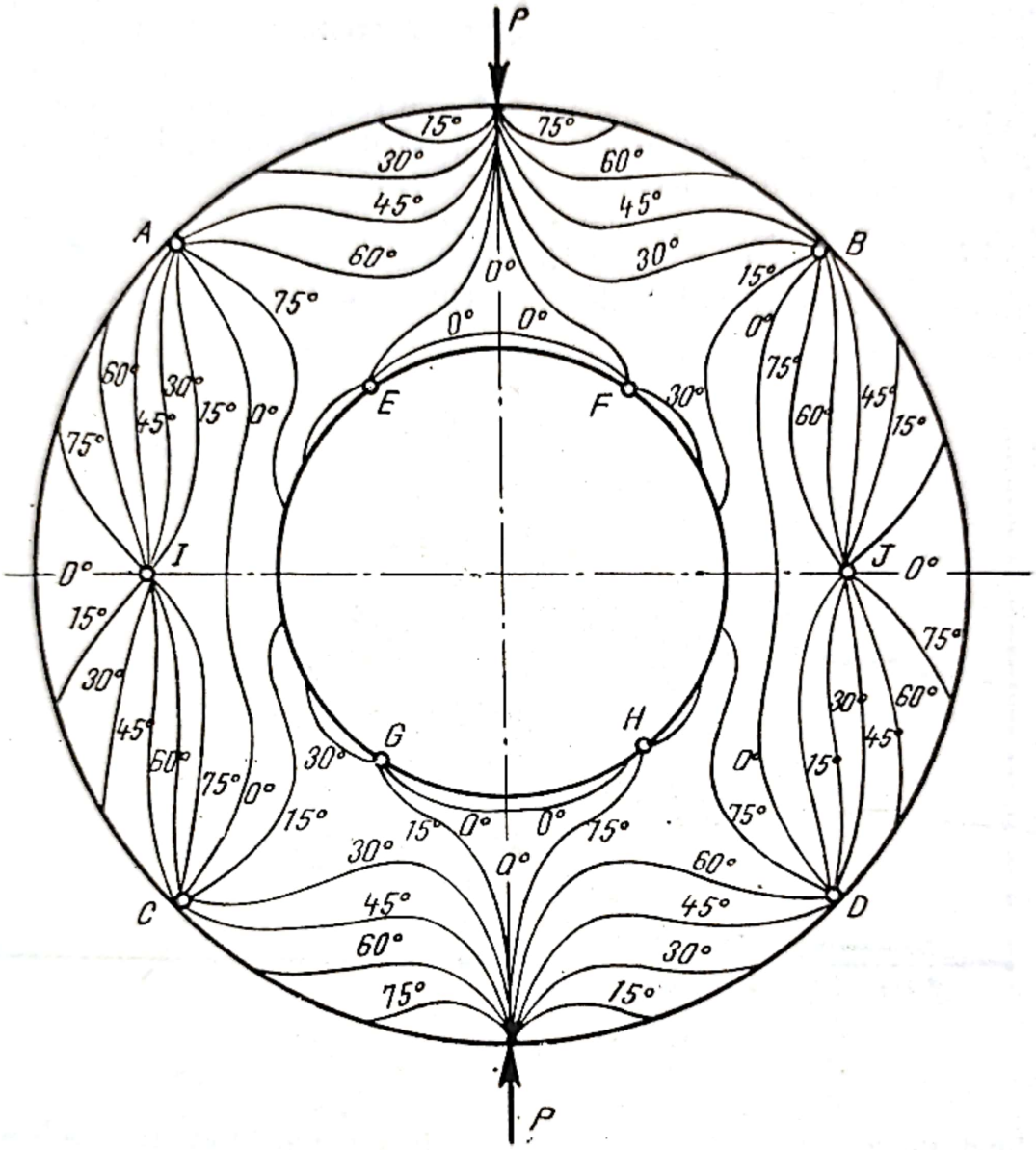


Fig. 4.20.

Din examinarea figurii 4.20 rezultă :

— izoclinele corespunzătoare tuturor parametrilor trec prin punctele izotrope A, B, C, . . . , J ;

— parametrul fiecărei izocline coincide cu unghiul pe care îl face cu orizontala, tangenta dusă la contur în punctul în care izoclina intersectează conturul ;

— tensiunile tangenţiale fiind nule în lungul axelor verticală şi orizontală, aceste axe coincid cu direcţiile principale şi sînt deci şi izocline de parametru zero ;

— tensiunile din vecinătatea punctelor de aplicație a sarcinii concentrate fiind tensiuni principale, direcțiile principale din această zonă vor varia de la 0_0 la 180° și, prin urmare, izoclinele corespunzînd tuturor parametrilor vor trece prin aceste puncte.

4.4.2. TRASAREA IZOSTATICELOR

Avînd rețeaua de izocline se pot trasa izostaticele care reprezintă *traiectoriile tensiunilor principale*. Existînd două tensiuni principale vor rezulta două familii de izostatice rectangulare.

Pentru trasarea traiectoriilor tensiunilor principale se alege un sistem de axe xOy (fig. 4.21). Pe axa Oy se aleg o serie de puncte $P_1, P_2, \ldots, P_n$, la distanță egală convenabil aleasă. Prin punctul P_1 se duce dreapta *1*

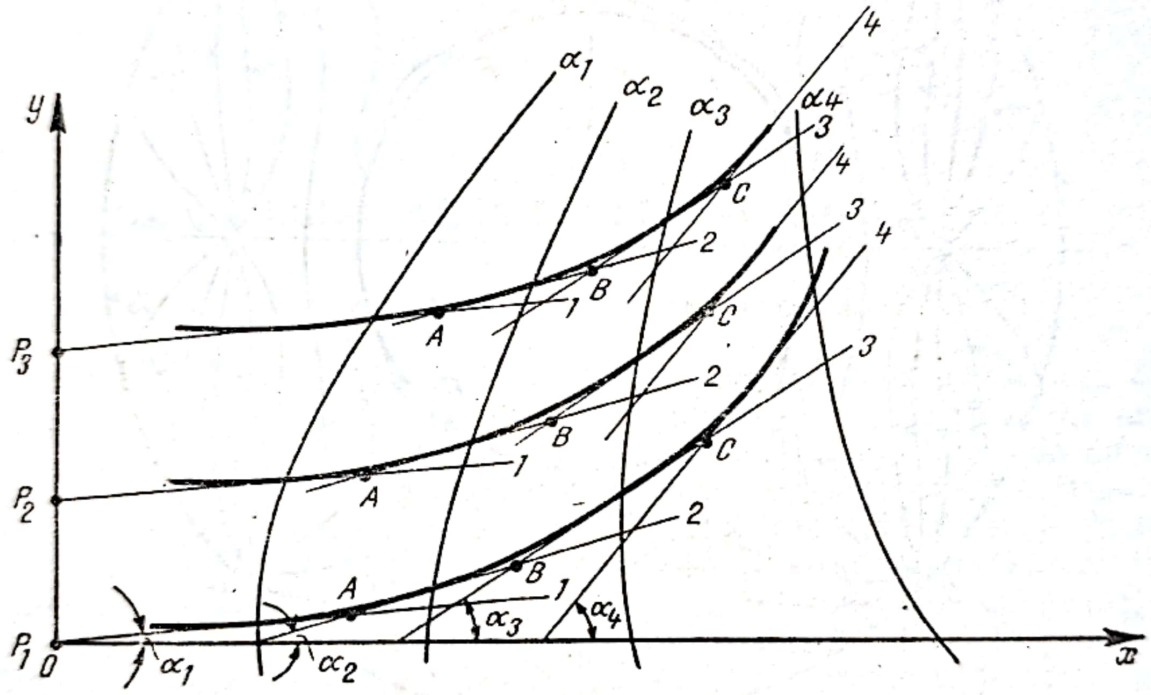


Fig. 4.21.

care face cu axa Ox unghiul α_1 (identic cu parametrul izoclinei α_1). Se notează cu A mijlocul distanței dintre izoclinele α_1 și α_2 măsurată pe dreapta *1*. Prin punctul A se duce dreapta *2* care face cu Ox unghiul α_2. Prin mijlocul distanței dintre izoclinele α_2 și α_3 (punctul B), se duce dreapta *3* care face cu orizontala unghiul α_3. Apoi prin mijlocul distanței dintre izoclinele α_3 și α_4 măsurată pe dreapta 3 (punctul C), se duce dreapta *4* care face cu orizontala unghiul α_4 ș.a.m.d. Înfășurătoarea dreptelor *1*, *2*, *3*, *4*, este o izostatică. Repetînd aceeași construcție, dar pornind din punctele P_2, P_3, .., P_n, se obține o familie de izostatice. Cealaltă familie se obține ducînd curbe ortogonale pe izostaticele trasate prin procedeul descris mai sus.

Scanned with OKEN Scanner

Izocromatele se înregistrează de regulă prin fotografiere, folosind polariscopul cu lumină polarizată circular, care aşa după cum s-a arătat elimină izoclinele. O problemă importantă care se ridică în acest caz este citirea cît mai precisă a ordinului de bandă. În cazul folosirii polariscopului cu cîmp întunecat şi cu cîmp luminat se pot determina cu precizie atît ordinele de bandă întregi (1, 2, 3, . . . , k), cît şi cele fracţionare $\left(0{,}5\,;\ 1{,}5\,;\ 2{,}5\,;\ \ldots\,;\ \frac{2k+1}{2}\right)$.

Stabilirea ordinului izocromatelor (numerotarea), se face pornind de la punctele izotrope (singulare) care corespund izocromatei de ordinul zero. În absenţa punctelor singulare, pentru numerotarea izocromatelor se are în vedere că punctul de intersecţie a două muchii perpendiculare

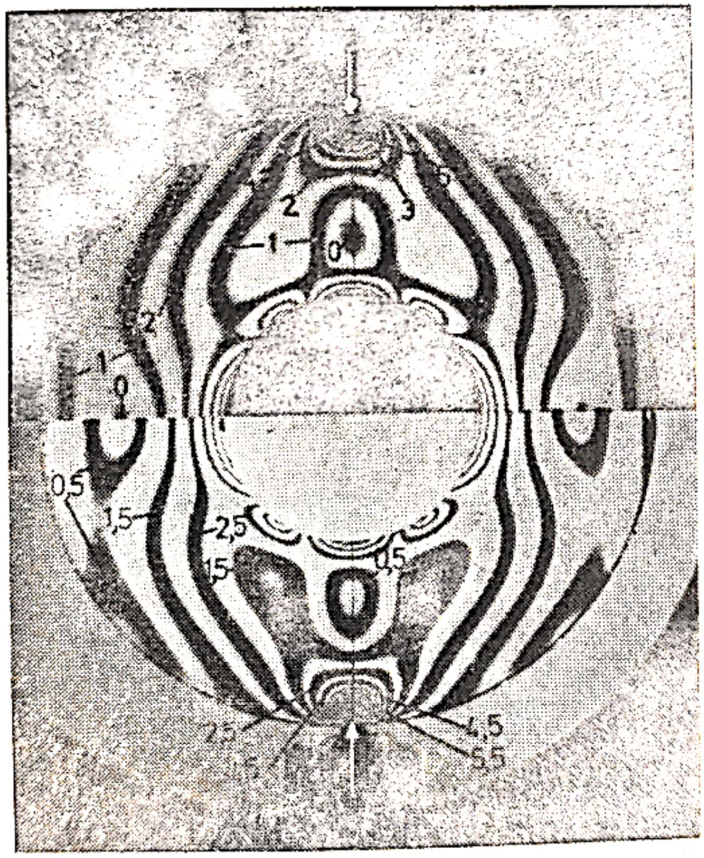


Fig. 4.22.

aflate pe un contur neîncărcat, este un punct singular. În fig. 4.22 se prezintă un exemplu de numerotare a izocromatelor.

De multe ori este necesar să se cunoască cu precizie ordinul de bandă într-un punct situat între două izocromate. Determinarea ordinului de bandă în acest caz printr-o simplă operaţie de interpolare nu este corectă, deoarece aşa cum rezultă din (4.40) intensitatea luminii variază după o

lege sinusoidală. În fig. 4.23 se prezintă variaţia intensităţii luminoase transmisă printr-o epruvetă solicitată la întindere de o sarcină progresivă observată într-un polariscop cu lumină polarizată circular. Diferenţa între ordonatele punctelor situate pe curbele trasate cu linie plină şi linie

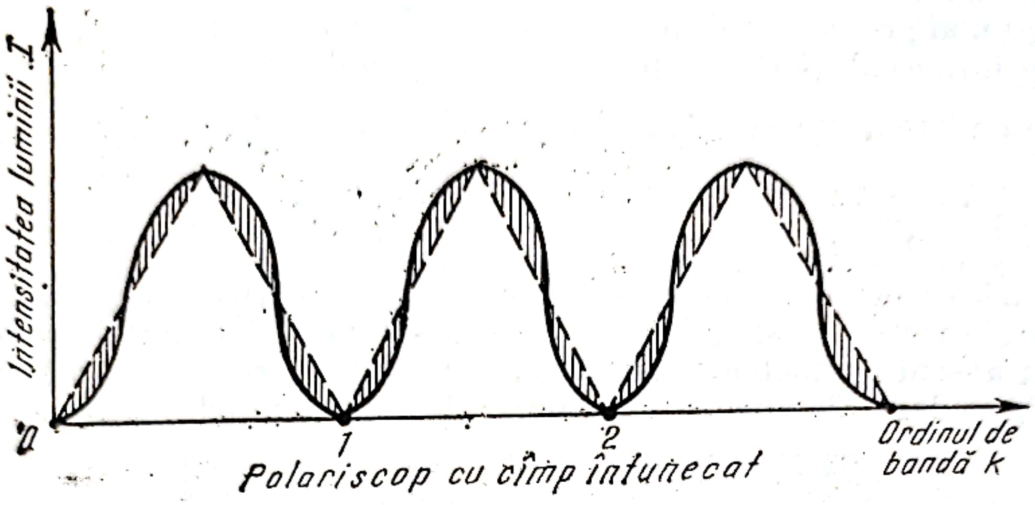


Fig. 4.23.

întreruptă, arată eroarea care se face atunci cînd ordinul de bandă fracţionar se determină prin interpolare.

Pentru determinarea cu precizie a valorilor fracţionare ale ordinului de bandă se utilizează aşa zisele metode de compensare. În practică se utilizează mai des următoarele trei metode de compensare :

a) compensarea cu epruvetă de tracţiune ;
b) compensarea cu compensatorul Babinet-Soleil ;
c) compensarea cu metoda Tardy.

Toate aceste metode de compensare necesită cunoaşterea prealabilă a direcţiilor principale în punctul în care se citeşte ordinul de bandă.

4.4.4. COMPENSAREA CU EPRUVETĂ DE TRACŢIUNE

Funcţionarea compensatorului cu epruvetă de tracţiune se bazează pe faptul că o stare plană de tensiune poate fi descompusă într-o stare de tensiune hidrostatică şi o stare de tensiune uniaxială, aşa cum rezultă din fig. 4.24. După cum s-a arătat, starea de tensiune hidrostatică $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$, corespunde ordinului de bandă zero, în timp ce starea de tensiune uniaxială corespunde unei valori oarecare a ordinului de bandă.

Dacă în faţa modelului aflat în polariscop se plasează pe direcţia σ_2, o platbandă din acelaşi material şi de aceeaşi grosime, se poate reduce întîrzierea între cele două componente ale luminii care traversează modelul, prin tensionarea epruvetei cu $\sigma_1 - \sigma_2$. Întîrzierea este redusă la zero (compensare totală), atunci cînd imaginea epruvetei privită prin analizor se întunecă (fig. 4.25). Pentru o determinare mai exactă a ordinului de bandă, acest tip de compensator este recomandat să fie folosit în lumină albă.

Scanned with OKEN Scanner

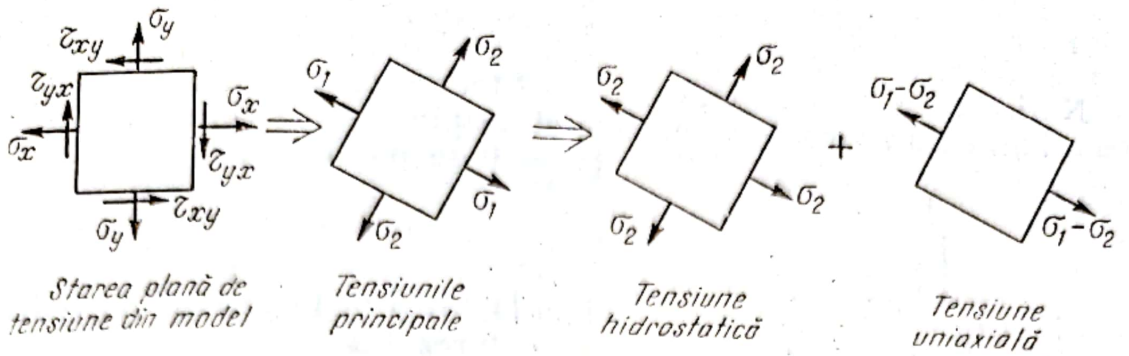


Fig. 4.24.

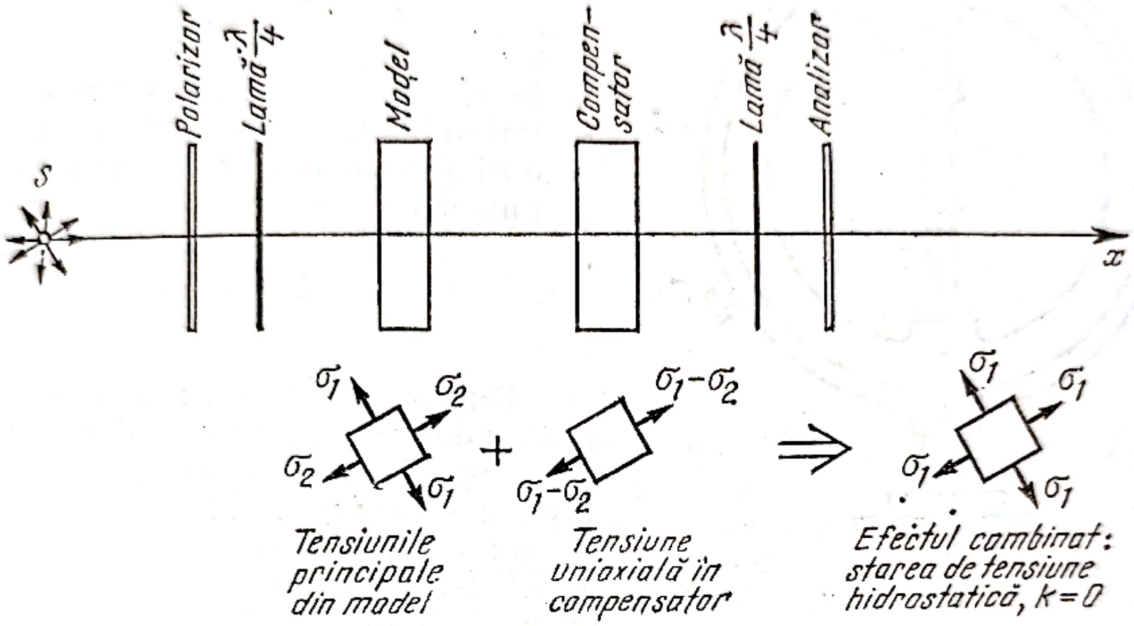


Fig. 4.25.

În fig. 4.26 se prezintă schematic un compensator cu epruvetă de tracțiune. Epruveta E, este montată într-un inel rigid I. Încărcarea se realizează printr-un dispozitiv cu filet micrometric S, etalonat în prealabil. Întreg sistemul se poate roti pe un cadran gradat C, putînd fi blocat într-o poziție oarecare cu ajutorul șurubului de blocare B.

Pentru determinarea ordinului de bandă într-un punct se procedează astfel :

— se determină parametrul izoclinei în punctul respectiv utilizînd lumina albă polarizată plan ;

— se așază modelul în polariscopul cu lumină polarizată circular, utilizînd sursa de lumină albă ;

— se fixează compensatorul cu epruveta orientată în lungul uneia din direcțiile tensiunilor principale determinate în punctul considerat din model ;

— se încarcă compensatorul pînă cînd se observă, pe epruvetă o bandă întunecată mărginită de două benzi galbene într-o parte și cealaltă. Ordinul de bandă în epruvetă este același cu cel din model. În cazul în

care nu se obţine banda întunecată însemnează că compensatorul a fost orientat pe direcţia σ_1 şi este necesar să se rotească cu 90°.

Notînd cu P sarcina cu care a fost încărcat compensatorul, cu n şi h dimensiunile transversale ale epruvetei şi ţinînd seama că în cazul epruvetei $\sigma_2 = 0$ se poate scrie

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_1 = \frac{P}{bh}. \qquad (4.52)$$

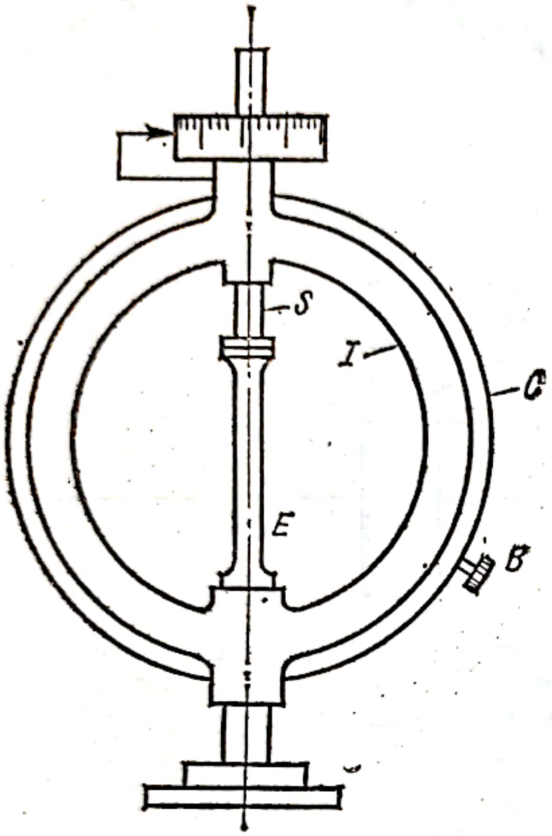


Fig. 4.26.

Din (4.45) şi (4.46), avînd în vedere că $\sigma_2 = 0$ rezultă

$$k = \frac{\sigma_1 h}{\sigma_0'} \qquad (4.53)$$

unde σ_0' este constanta fotoelastică a materialului. Combinînd (4.52) cu (4.53), se obţine valoarea ordinului de bandă în punctul considerat

$$k = \frac{P}{b\sigma_0'}. \qquad (4.54)$$

După cum se observă din (4.54), pentru determinarea ordinului de bandă cu acest tip de compensator nu este necesar ca epruveta compensatorului să fie confecţionată din acelaşi material cu modelul şi să aibă aceeaşi grosime cu a modelului.

Această metodă de compensare pe lîngă faptul că permite determinarea valorilor fracţionare ale ordinului de bandă dintr-un punct al modelului, mai dă posibilitatea identificării tensiunilor σ_1 şi σ_2.

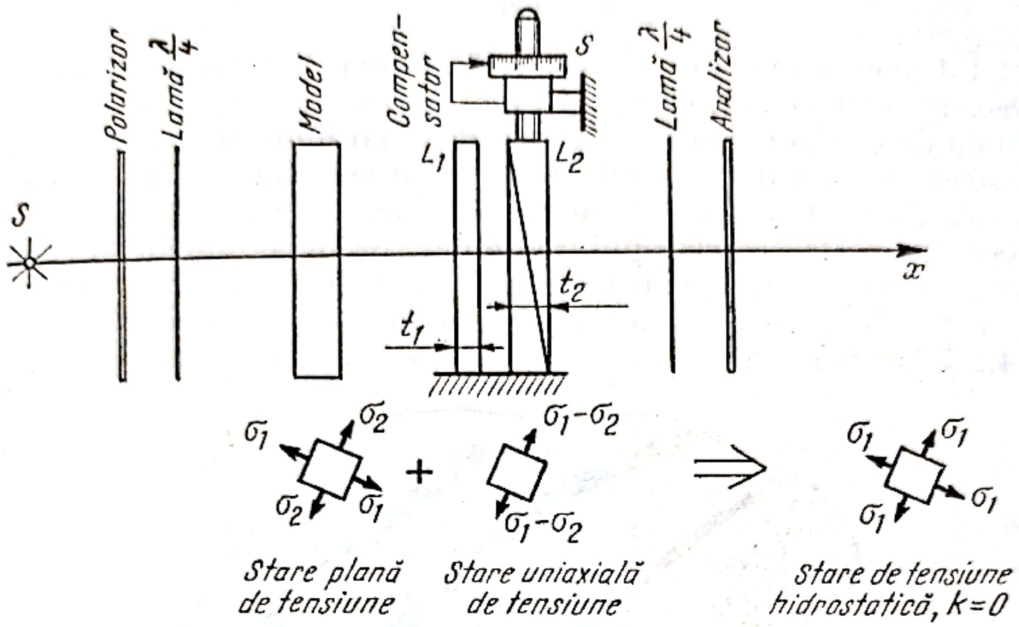
4.4.5. COMPENSAREA CU COMPENSATORUL BABINET-SOLEIL

Metoda de compensare Babinet-Soleil constă în introducerea pe lîngă model, în cîmpul polariscopului cu lumină polarizată circular, a unei alte surse de birefringenţă. În fig. 4.27 se prezintă suprapunerea efectelor optice produse de cele două surse de birefringenţă (modelul şi compensatorul). Efectul optic (ordinul de bandă) dintr-un punct al modelului este proporţional cu $\sigma_1 - \sigma_2$. Cînd compensatorul este introdus în cîmpul polariscopului, pe direcţia σ_2 efectul optic cumulat poate fi variat prin ajustarea compensatorului.

Compensatorul Babinet-Soleil constă din două lame de cuarţ L_1 şi L_2, una de grosime constantă t_1, iar cealaltă de grosime variabilă t_2, fiind alcătuită din două părţi în formă de pană. Efectul optic produs de cele două pene de cuarţ este aditiv şi proporţional cu grosimea totală. Una dintre penele de cuarţ este fixă, iar cealaltă se poate deplasa în lung prin rotirea

Scanned with OKEN Scanner

unui șurub micrometric etalonat S, realizîndu-se astfel variația grosimii t_2 a lamei. După cum se știe, cuarțul este un material care prezintă birefringență permanentă. Cele două lame de cuarț L_1 și L_2 sînt montate cu



Stare plană de tensiune | Stare uniaxială de tensiune | Stare de tensiune hidrostatică, $k=0$

Fig. 4.27.

axele optice perpendiculare, astfel că în mod normal cînd lama L_2 are grosimea maximă t_2, se obține extincția totală.

Întîrzierea totală produsă de compensator cînd este introdus în polariscop poate fi variată continuu prin modificarea grosimii lamei L_2 cu ajutorul șurubului micrometric S. Cînd $t_1 = t_2$ întîrzierea impusă este zero, iar cînd $t_2 \gtrless t_1$ compensatorul mărește sau micșorează întîrzierea rezultantă. În acest caz se recomandă să se folosească lumină monocromatică.

Pentru determinarea ordinului de bandă fracționar cu acest instrument se procedează astfel:

— se determină direcțiile tensiunilor principale în punctul considerat din model;

— se plasează compensatorul în polariscop în fața modelului în dreptul punctului considerat, cu axa optică paralelă cu direcția tensiunii σ_2;

— se rotește șurubul micrometric pînă cînd se obține extincție totală în punctul respectiv. Citirile făcute pe scala șurubului micrometric sînt proporționale cu ordinul de bandă din punctul cercetat.

Să presupunem că punctul în care urmează să fie determinat ordinul de bandă (notat cu A în fig. 4.28) se află între izocromatele de ordinul 3 și 4, iar constanta aparatului este $k = 1{,}8$ diviziuni/ordin de bandă. Plasînd instrumentul în A, să presupunem că extincția totală se obține prin rotirea șurubului micrometric pînă la diviziunea 6,5. Ținînd seama

că ordinul de bandă $k = 3$ corespunde la $3 \times 1{,}8 = 5{,}4$ diviziuni, ordinul de bandă în punctul A va fi

$$k_A = 3 + \frac{6{,}5 - 5{,}4}{1{,}8} = 3{,}612.$$

În felul acesta ordinul de bandă în punctul A poate fi determinat cu o precizie de trei zecimale.

Metoda de compensație Tardy este cea mai folosită în practică pentru determinarea ordinului de bandă într-un punct din model, deoarece nu necesită echipament sau instrumente auxiliare. În acest caz se folosesc elementele optice ale polariscopului circular. Să presupunem că elementele polariscopului sînt aranjate pentru cîmp întunecat și că în jurul punctului A, în care urmează să se determine ordinul de bandă, se observă franjele din fig. 4.28. De asemenea, se consideră că direcțiile tensiunilor principale

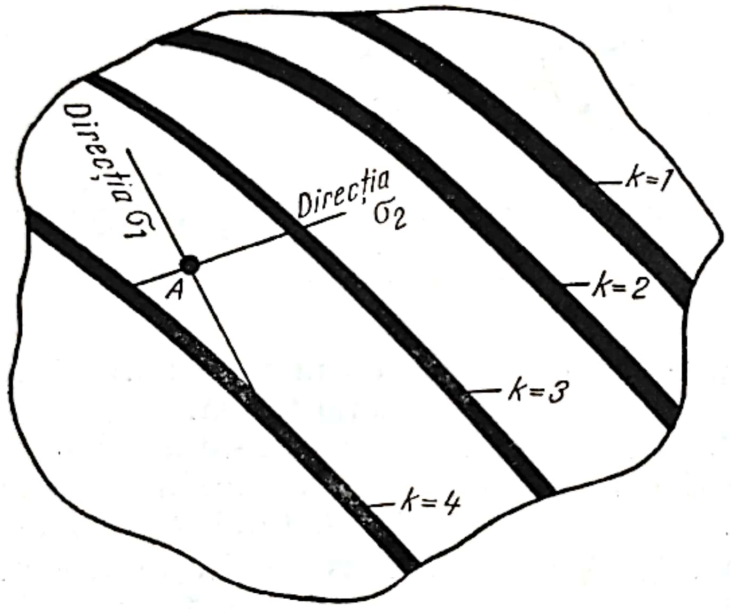


Fig. 4.28.

4.4.6. COMPENSAREA PRIN METODA TARDY

din punctul A au fost determinate anterior și sînt cunoscute. Pentru determinarea ordinului de bandă în punctul A, se procedează astfel:

— se rotește întreg sistemul optic al polariscopului (polarizor, analizor și ambele lame sfert de undă), menținîndu-se aceeași poziție relativă între ele, pînă cînd axele polarizorului și analizorului se aliniază cu axele tensiunilor principale din punctul A (în acest caz franjele observate nu se modifică);

— se rotește analizorul cu n grade pînă cînd se obține extincție totală, astfel ca banda de ordinul 3 să se deplaseze spre punctul A. Ordinul de bandă în acest caz se modifică cu $n/180$ din valoarea întreagă, astfel că ordinul de bandă corespunzător punctului A va fi

$$k_A = 3 + \frac{n}{180}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Această valoare poate fi verificată dacă rotim analizorul în sens invers cu m grade, pînă cînd se obţine extincţia totală, astfel ca franja de ordinul 4 să se deplaseze spre punctul A. În acest caz,

$$k_A = 4 - \frac{m}{180}.$$

Pentru verificare trebuie ca

$$3 + \frac{n}{180} \equiv 4 - \frac{m}{180}.$$

După cum se observă această metodă este foarte simplă şi rapidă permiţînd determinarea cu precizie a ordinului de bandă în orice punct al modelului. Precizia acestei metode depinde de calitatea lamelor sfert de undă cu care este echipat polariscopul.

4.4.7. MULTIPLICAREA ORDINULUI DE BANDĂ

Metodele de compensare folosite pentru determinarea valorilor fracţionare ale ordinului de bandă care au fost prezentate mai sus, prezintă două neajunsuri : 1) necesită determinarea prealabilă a direcţiilor tensiunilor principale în punctele de interes, 2) furnizează informaţii în puncte discrete, reducînd astfel fotoelasticitatea la o metodă de analiză punct cu punct.

Utilizînd un sistem de semioglinzi, D. Post [37] a stabilit o tehnică nouă de compensare care permite determinarea simultană cu precizie, a valorilor fracţionare ale ordinului de bandă în toate punctele modelului. În acest scop polariscopul standard cu lumină polarizată circular a fost modificat aşa cum rezultă din fig. 4.29.

Polariscopul este prevăzut cu două lentile de cîmp L_1 şi L_2 care fac ca modelul să fie traversat de un fascicul de raze paralele şi totodată au rolul de a focaliza într-un plan razele transmise prin semioglindă.

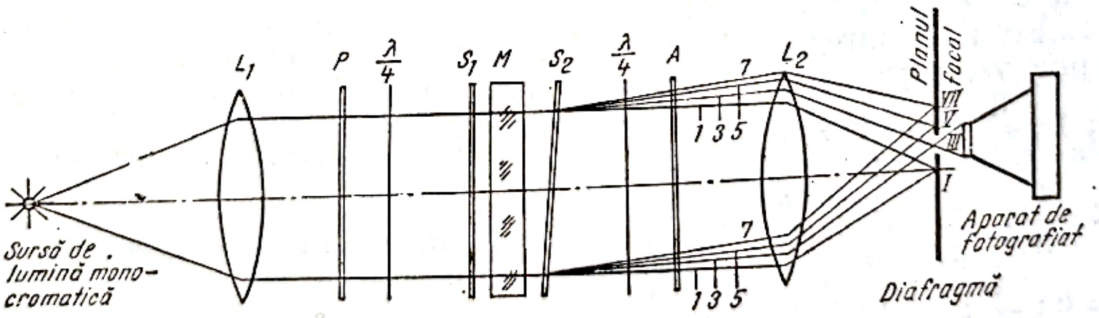


Fig. 4.29.

Modelul fotoelastic este aşezat între două semioglinzi S_1 şi S_2 dintre care una (S_1) este perpendiculară pe axa polariscopului iar cealaltă (S_2) este uşor înclinată. Efectul optic produs de semioglinda înclinată S_2 asupra luminii care traversează modelul în cele două sensuri este prezentat în fig. 4.30. După cum se observă, fiecare rază de lumină iese din semi-

oglinda S_2 sub un anumit unghi care depinde de numărul de traversări ale modelului. Astfel, raza *1* traversînd modelul o singură dată se transmite prin semioglinda S_2 sub unghiul 0°, raza *3* traversează modelul de trei ori și se transmite prin semioglindă sub unghiul 2φ, raza *5* traversează modelul de cinci ori și se transmite sub unghiul 4φ, ș.a.m.d. Deoarece diferitele raze de lumină care ies din semioglinda S_2 sînt înclinate sub diferite unghiuri față de axa polariscopului, este posibil ca fiecare rază să fie izolată. În acest sens razele sînt focalizate în diferite puncte situate în planul focal al lentilei L_2. Fiecare din aceste raze poate fi fotografiată cu ajutorul unui aparat de fotografiat aranjat pentru punctul respectiv. Pentru a izola imaginile celorlalte puncte, de regulă, se folosește o diafragmă care permite vizualizarea imaginii corespunzătoare unui anumit factor de multiplicare. Astfel în fig. 4.29 aparatul de fotografiat este aranjat să fotografieze o imagine a modelului în care franjele izocromate sînt multiplicate de trei ori ($n = 3$). În fig. 4.31 se prezintă imaginea unui model (după: Courtesy Polarizing Instrument Co, Inc.) la care franjele izocromate au fost multiplicate de trei respectiv de cinci ori. Franjele izocromate corespunzătoare date de razele *1*, *3*, *5*, *7*,... etc. pot fi fotografiate atît în cîmp luminat cît și în cîmp întunecat. Se consideră de exemplu că se fac fotografii în cele două cîmpuri pentru razele *1*, *3* și *5*. Franjele înregistrate prin fotografierea imaginii *I* în cele două cîmpuri vor reprezenta valorile ordinului de bandă în succesiunea: $k = 0$; $\frac{1}{2}$; 1; $\frac{3}{2}$; 2; $\frac{5}{2}$ etc., cele corespunzătoare imaginii *III* vor da $k = 0$; $\frac{1}{6}$; $\frac{1}{3}$; $\frac{1}{2}$; $\frac{2}{3}$; $\frac{5}{6}$ etc., iar cele obținute pentru imaginea *V* vor da $k = 0$; $\frac{1}{10}$; $\frac{1}{5}$; $\frac{3}{10}$; $\frac{2}{5}$; $\frac{1}{2}$ etc. Suprapunînd datele înregistrate din aceste determinări se poate determina valoarea ordinului de bandă cu mare precizie în toate punctele modelului.

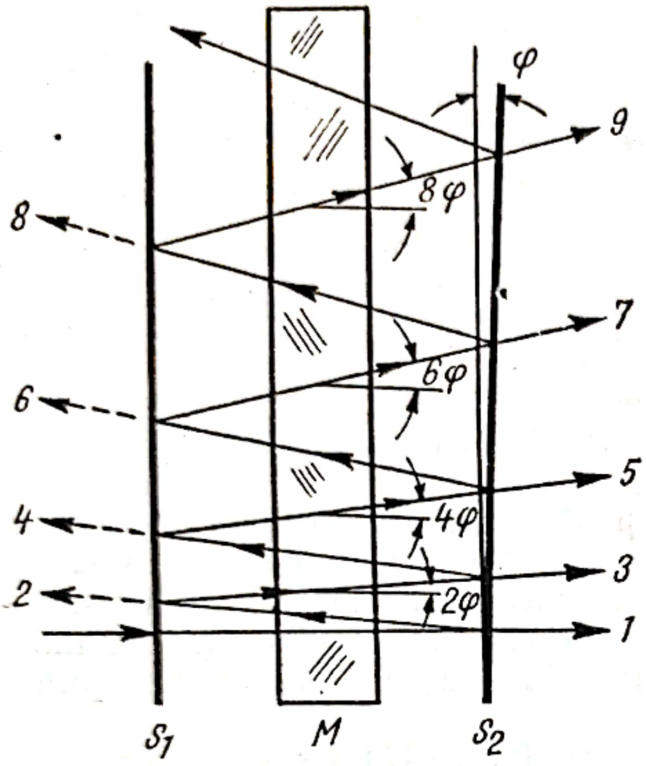


Fig. 4.30.

După cum se vede în fig. 4.30 lungimea drumului pe care îl străbate lumina în modelul fotoelastic depinde de unghiul de înclinare φ al semioglinzii S_2, de numărul de traversări ale modelului, cît și de distanța dintre oglinzi. Toți acești factori fac ca în cazul unor multiplicări de

Scanned with OKEN Scanner

ordin ridicat să se introducă erori apreciabile. Pe de altă parte în urma traversărilor repetate razele de lumină își reduc considerabil intensitatea, ieșind din semioglinda S_2 cu intensitatea foarte scăzută. De aceea în practică factorul de multiplicare nu depășește valoarea cinci, maxim

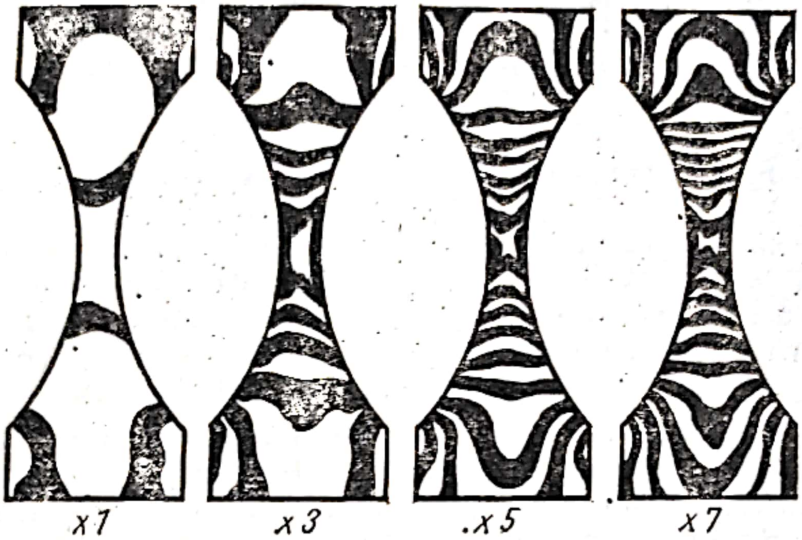


Fig. 4.31.

șapte. Rezultatele obținute prin utilizarea acestei metode sînt de asemenea determinate de calitatea semioglinzilor depinzînd foarte mult de coeficienții de reflexie R și de transmisie T ai acestora. Astfel, pentru obținerea unui factor de multiplicare egal cu cinci, care este suficient pentru majoritatea aplicațiilor, se recomandă folosirea unui set de semioglinzi avînd coeficientul de reflexie $R = 0{,}67$, respectiv de transmisie $T = 0{,}33$, în care una din semioglinzi să fie înclinată cu un unghi $\varphi = 3°$ [6].

Prin utilizarea semioglinzilor în polariscopul cu lumină polarizată circular se mai pot obține și alte efecte optice deosebit de importante pentru cercetările de fotoelasticitate, cum este efectul de „ascuțire a franjelor". Astfel dacă cele două semioglinzi sînt paralele între ele, datorită reflexiilor multiple ale razelor care străbat modelul, se obține o subțiere pronunțată a franjelor albe și negre care apar simultan pe un fond gri. În felul acesta utilizînd efectul „ascuțirii franjelor" se pot obține pe aceeași fotografie franje întunecate care corespund la valorile 0; 1; 2; 3, etc. ale ordinului de bandă și franje luminate care corespund la valorile ordinului de bandă $\frac{1}{2}$; $\frac{3}{2}$; $\frac{5}{2}$ etc.

4.5. SEPARAREA TENSIUNILOR PRINCIPALE FOLOSIND DETERMINĂRILE FOTOELASTICE

După cum s-a arătat în paragrafele precedente, prin metoda fotoelastică se pot determina direcțiile principale, cu ajutorul izoclinelor și diferența tensiunilor principale $\sigma_1 - \sigma_2$, cu ajutorul izocromatelor. Pentru

cunoaşterea stării de tensiuni în orice punct al modelului trebuie determinate valorile individuale σ_1 şi σ_2 ale tensiunilor principale. Cu excepţia contururilor neîncărcate, în lungul cărora se pot determina tensiunile principale direct din determinările fotoelastice, separarea tensiunilor principale se face fie utilizînd ecuaţiile diferenţiale de echilibru pentru starea plană de tensiuni, fie folosind alte metode auxiliare prin care se determină suma tensiunilor principale $\sigma_1 + \sigma_2$, aşa cum se va vedea în paragraful 4.6.

4.5.1. DETERMINAREA TENSIUNILOR PE UN CONTUR NEÎNCĂRCAT

Se ştie că, în general, tensiunile maxime apar pe conturul pieselor şi de aceea, din punct de vedere practic, pentru dimensionarea corectă a pieselor, este importantă cunoaşterea acestor tensiuni. Curba de variaţie a tensiunilor pe conturul neîncărcat al unei piese se poate trasa cu uşurinţă cu ajutorul izocromatelor obţinute prin fotoelasticitate.

Dacă se consideră un element de volum mărginit de conturul neîncărcat al unei piese, supusă la o stare plană de tensiune (fig. 4.32, a), atît tensiunea normală σ_y cît şi cea tangenţială τ sînt nule. Prin urmare, conturul în acet caz este o faţă principală. Cercul lui Mohr fiind tangent în origine la axa τ (fig. 4.32, b), rezultă că diferenţa tensiunilor principale $(\sigma_1 - \sigma_2)_c$ pe acest contur, este egală cu tensiunea principală σ_1, orientată după direcţia tangentei la contur. Dacă un punct i de pe contur este inter-

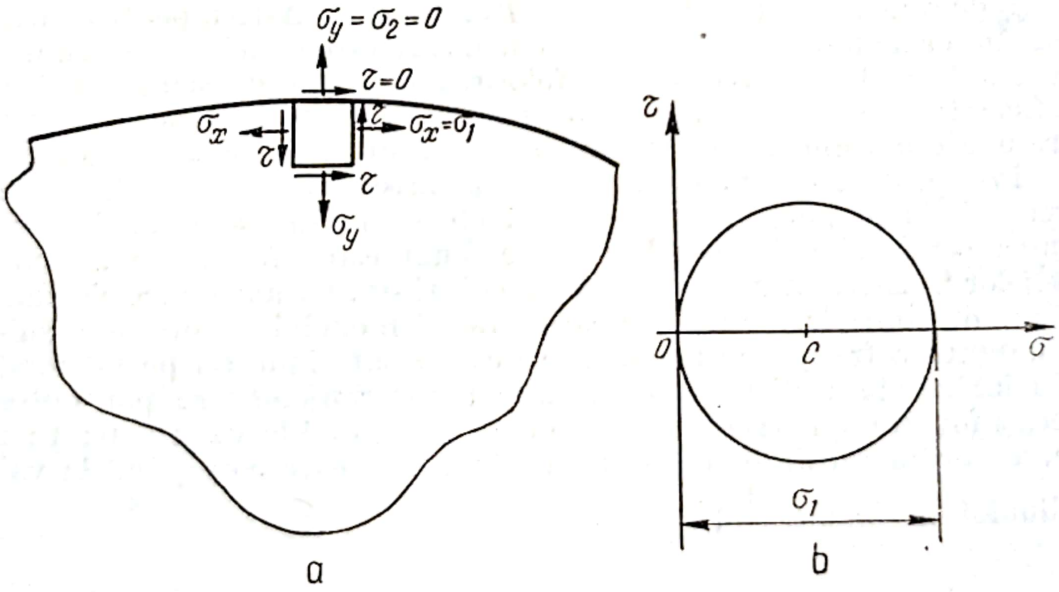


Fig. 4.32.

sectat de izocromata de ordinul k (fig. 4.33), tensiunea în acest punct are valoarea

$$(\sigma_{1i})_c = k\sigma_0 \tag{4.55}$$

unde σ_0 este constanta fotoelastică a modelului.

Reprezentînd la scară valorile $(\sigma_1)_c$, calculate în punctele de intersecţie ale izocromatelor cu conturul, se obţine diagrama de variaţie a tensiunilor pe conturul neîncărcat (fig. 4.33).

Semnul tensiunilor pe contur se poate deduce, în general, din modul de solicitare a piesei. Cînd acest lucru nu e posibil, se poate folosi metoda

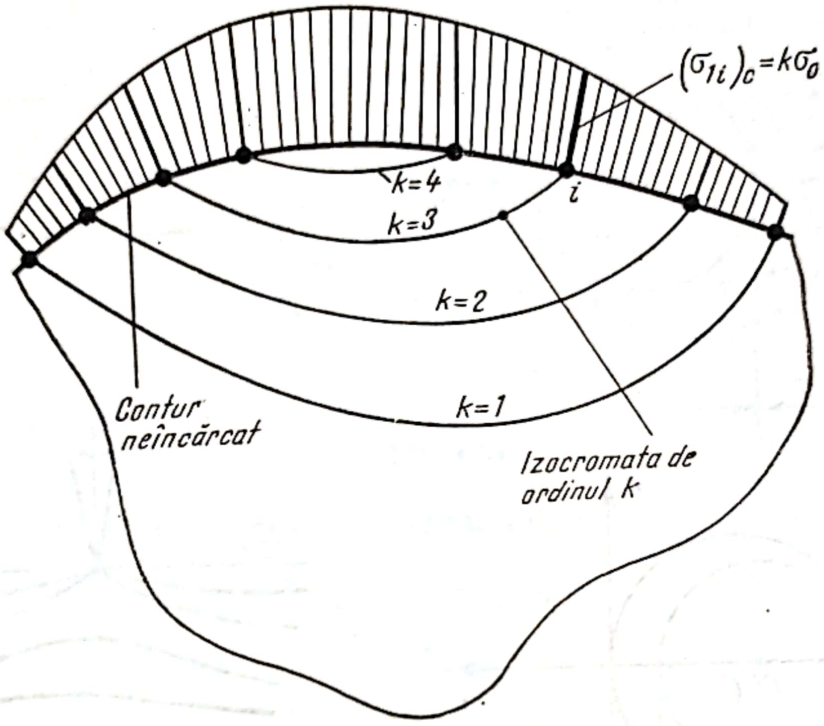


Fig. 4.33.

„probei cu vîrf ascuţit". Pentru aceasta se apasă conturul cu vîrful unei şurubelniţe, de exemplu, şi se urmăreşte evoluţia izocromatelor. Presupunînd că tensiunea principală σ_1, orientată după tangenta la contur este pozitivă, starea de tensiuni poate fi reprezentată prin cercul trasat cu o linie continuă în fig. 4.34, a. Tensiunea normală la contur σ_2, produsă de vîrf, fiind de compresiune va avea ca efect mărirea diametrului cercului, trasat cu linie întreruptă în aceeaşi figură, ceea ce înseamnă mărirea ordinului izocromatei pe contur. În cazul că ordinul izocromatelor este crescător spre contur, ca în fig. 4.34, b, se observă că izocromata de pe contur este deplasată spre interior, în locul ei apărînd izocromata de ordin superior.

Dacă tensiunea principală σ_2 paralelă cu tangenta la contur este de compresiune, deci negativă, starea de tensiuni pe contur este reprezentată prin cercul trasat cu linie continuă în fig. 4.34, c. Aplicarea pe contur a unei sarcini de compresiune face ca diametrul cercului să se micşoreze şi să scadă ordinul izocromatei. Dacă se consideră, ca şi în cazul precedent, că ordinul izocromatelor creşte spre contur, în punctul în care se aplică sarcina de compresiune, izocromatele din interior se vor deplasa către contur, ca în fig. 4.34, d.

Scanned with OKEN Scanner

Această metodă de stabilire a semnului tensiunilor pe contur poate fi folosită mai ales atunci cînd izocromatele au un traseu aproximativ paralel cu conturul şi ordinul izocromatei pe contur corespunde unei tensiuni mai mari decît cea care se naşte prin apăsarea vîrfului.

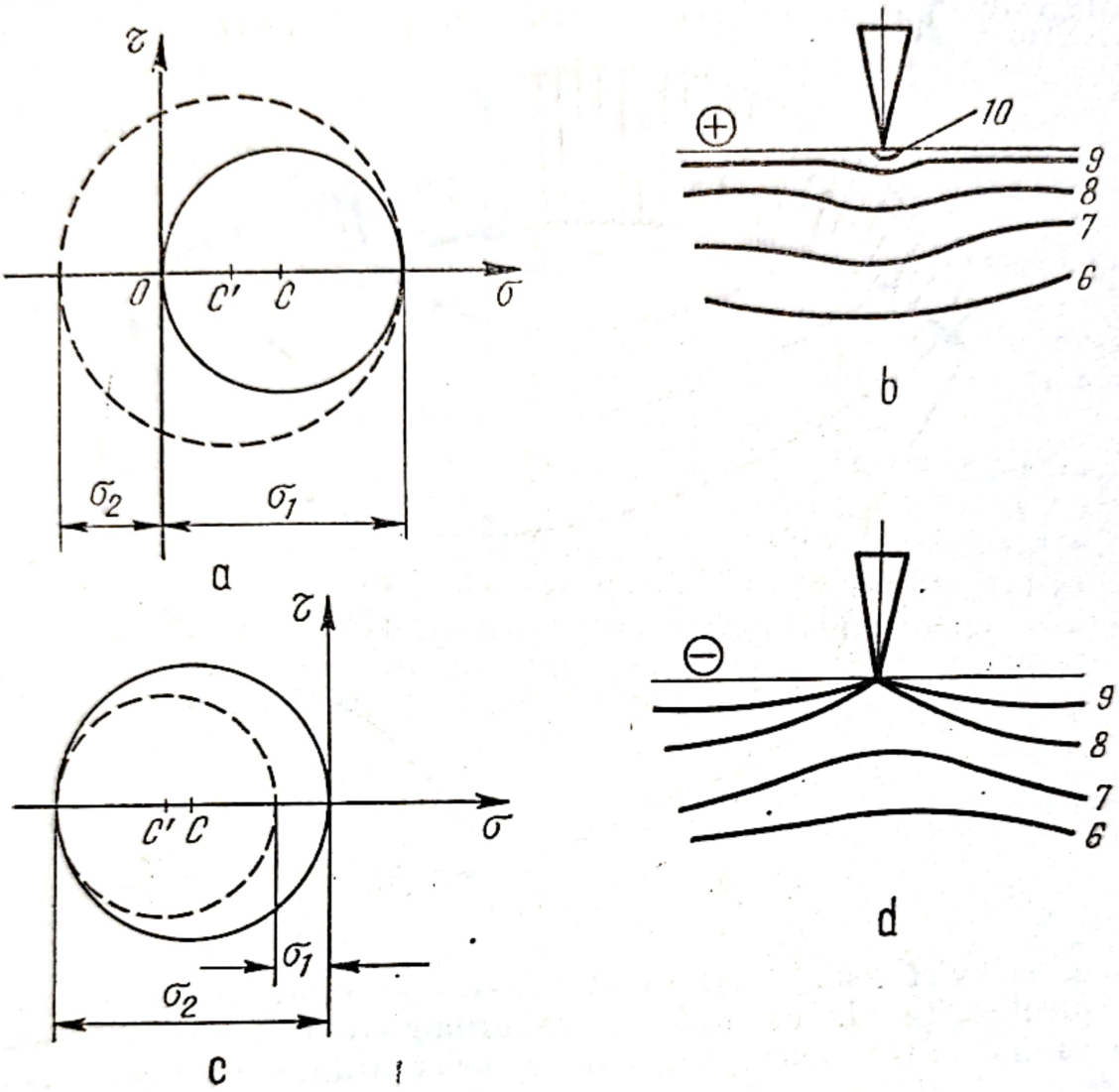


Fig. 4.34.

4.5.2. SEPARAREA TENSIUNILOR PRINCIPALE PRIN INTEGRAREA ECUAŢIILOR DIFERENŢIALE DE ECHILIBRU

Pentru cazul particular al unui element de volum supus unei stări plane de tensiune (fig. 4.35, a), la care se neglijează forţele masice, ecuaţiile lui Cauchy [2] se reduc la forma

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0. \qquad (4.56)$$

Dacă elementul de volum este mărginit de laturi curbilinii reprezentate prin două izostatice S_1 și S_2 care se intersectează în punctul 0 și prin alte două izostatice aflate la distanțele ds_1, respectiv ds_2, (fig. 4.35, b) ecuațiile

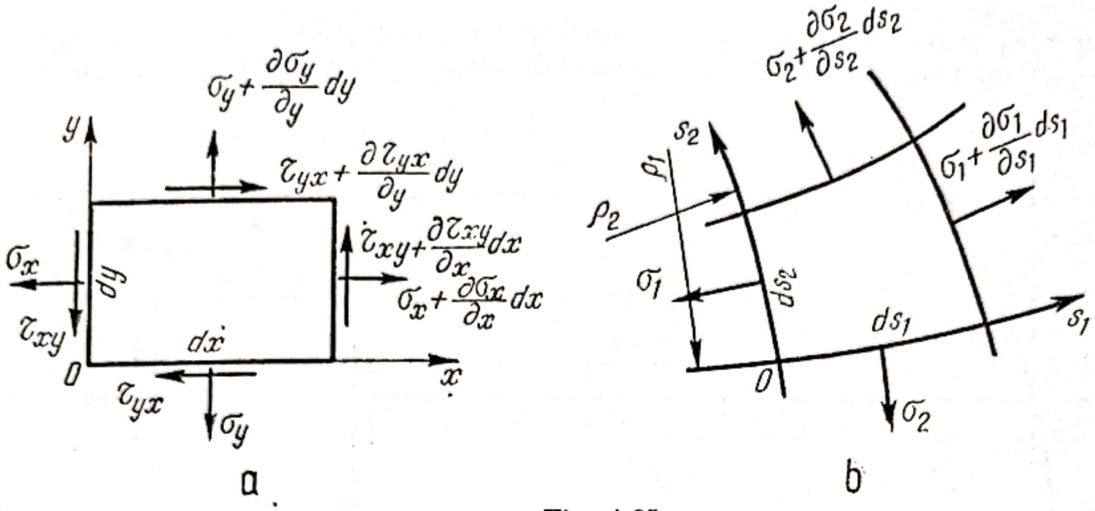


Fig. 4.35.

de echilibru Lamé-Maxwell [46], se scriu sub forma

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_2} = 0$$
$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial s_2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_1} = 0. \tag{4.57}$$

Folosind izoclinele și izocromatele, înregistrate așa cum s-a arătat în paragrafele 4.24 și 4.25, aceste ecuații diferențiale pot fi integrate obținîndu-se tensiunile principale σ_1 și σ_2, care, împreună cu direcțiile principale ce se obțin din izocline, determină complet starea de tensiune din model. Pentru integrarea ecuațiilor (4.56) sau (4.57) au fost elaborate numeroase metode care, deși au un caracter general, prezintă fiecare particularități care le recomandă pentru aplicare în anumite cazuri concrete.

În cele ce urmează se vor prezenta cîteva metode de integrare a ecuațiilor diferențiale de echilibru.

4.5.3. METODA DIFERENȚEI TENSIUNILOR TANGENȚIALE

Metoda diferenței tensiunilor tangențiale, elaborată de Frocht [8], permite determinarea tensiunilor principale pe o direcție oarecare din model, pornind de la un punct în care aceste tensiuni sînt cunoscute, de exemplu de pe un contur neîncărcat.

Integrînd prima din ecuațiile (4.56) se obține

$$\int_{x_0}^{x_1} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx = -\int_{x_0}^{x_1} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \tag{4.58}$$

Scanned with OKEN Scanner

sau, exprimînd pe (4.58) prin diferențe finite (fig. 4.36), rezultă

$$\sigma_x\Big|_{x_1} - \sigma_x\Big|_{x_0} = -\frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta y}\Big|_{\frac{x_0+x_1}{2}} \tag{4.59}$$

unde $\sigma_x|_{x_1}$ și $\sigma_x|_{x_0}$ sînt tensiunile normale în punctele x_1 respectiv x_0 de pe direcția aleasă, Δx, Δy sînt intervalele finite pe direcțiile x respectiv y.

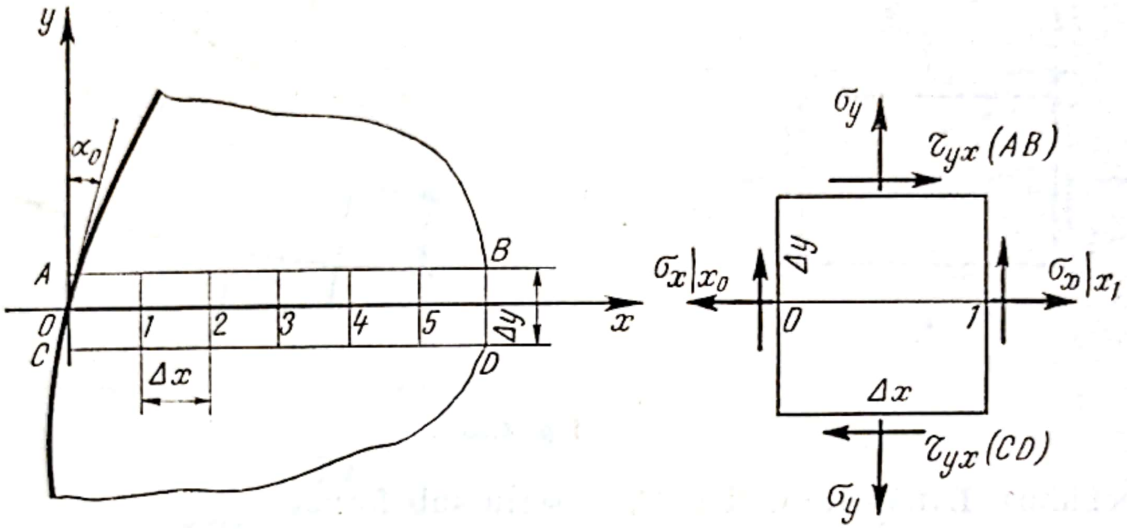


Fig. 4.36.

Intervalele Δx și Δy se pot lua egale, astfel că relația (4.59) se poate scrie sub forma

$$\sigma_x\Big|_{x_1} = \sigma_x\Big|_{x_0} - \Delta\tau_{yx}\Big|_{\frac{x_0+x_1}{2}}. \tag{4.60}$$

Deci, tensiunea normală într-un punct x_1 se poate calcula cunoscînd tensiunea în punctul x_0 precum și variația tensiunii tangențiale τ_{yx} pe direcția y, în mijlocul intervalului $\left(\text{la } \frac{x_0 + x_1}{2}\right)$.

Dacă punctul inițial x_0 se ia pe contur, tensiunea principală paralelă cu tangenta la contur se poate determina cu relația (4.55) cunoscînd ordinul izocromatei pe contur.

În cazul că direcția aleasă x, este normală la contur, $\sigma_2|_{x_0} = \sigma_x|_{x_0} = 0$. Dacă axa y face un unghi α_0 cu tangenta la contur, iar tensiunea principală paralelă cu tangenta este $\sigma_1|_{x_0}$, tensiunea $\sigma_x|_{x_0}$ se calculează cu relația

$$\sigma_x|_{x_0} = \sigma_1|_{x_0} \sin^2 \alpha_0. \tag{4.61}$$

Tensiunile tangențiale pe direcțiile AB respectiv CB se pot determina cunoscînd izocromatele și izoclinele care intersectează aceste direcții, cu relația

$$\tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sin 2\alpha. \tag{4.62}$$

Diferența tensiunilor principale în punctul considerat k, se deduce din ordinul izocromatei cu relația

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k\sigma_0 \tag{4.63}$$

unghiul α fiind parametrul izoclinei în același punct.

Pentru calculul lui $\Delta\tau_{yx}$ se determină tensiunea $\tau_{yx(AB)}$ pe direcția AB în mijlocul intervalului $\left(\text{la } \frac{x_0 + x_1}{2}\right)$, precum și tensiunea $\tau_{yx(CD)}$ pe direcția CD în punctul de aceeași abscisă, rezultînd

$$\Delta\tau_{yx}\Big|_{\frac{x_0+x_1}{2}} = \tau_{yx(AB)} - \tau_{yx(CD)}. \tag{4.64}$$

Trecînd la punctul x_2 se poate scrie relația

$$\sigma_x\Big|_{x_2} = \sigma_x\Big|_{x_1} - \Delta\tau_{yx}\Big|_{\frac{x_1+x_2}{2}} \tag{4.65}$$

cu care se determină $\sigma_x|_{x_2}$ procedînd analog ca pentru $\sigma_x|_{x_1}$. Procedeul se repetă pentru celelalte puncte de pe direcția x. Pentru verificare este bine ca punctul final să se găsească tot pe un contur neîncărcat în care tensiunile sînt cunoscute.

Tensiunile σ_y se calculează cu relația

$$\sigma_y = \sigma_x - (\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\alpha = \sigma_x - k\sigma_0\cos 2\alpha \tag{4.66}$$

unde, așa cum s-a arătat mai sus, k este ordinul izocromatei, σ_0 este constanta fotoelastică a modelului, iar α este parametrul izoclinei.

Pentru determinarea tensiunilor principale se pornește de la observația că, într-un punct, suma tensiunilor principale este constantă

$$\sigma_x + \sigma_y = \sigma_1 + \sigma_2. \tag{4.67}$$

Pe de altă parte, diferența tensiunilor principale rezultă din relația (4.63).

Rezolvînd sistemul format din ecuațiile (4.63) și (4.67) se obțin valorile individuale ale tensiunilor principale

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y + k\sigma_0)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y - k\sigma_0). \tag{4.68}$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru sistematizarea calculelor se poate proceda astfel (fig. 4.37, a). Se trasează pe o foaie de calc izoclinele și izocromatele pentru domeniul în care urmează să se determină tensiunile principale. Se trasează dreapta în lungul căreia se vor calcula tensiunile principale și se divizează într-un număr de segmente egale Δx. De asemenea se mai duc liniile AB și CD, paralele cu direcția aleasă, la distanța $\frac{\Delta y}{2}$ (de obicei se ia $\Delta x = \Delta y$).

În general, prin nodurile rețelei astfel obținute nu trec nici izocline și nici izocromate stfel că determinarea direcțiilor principale și a ordinului izocromatelor în noduri se face prin interpolare. Pentru aceasta, se trasează curbele de variație a unghiului direcțiilor principale în lungul segmentelor AB și respectiv CD, (fig. 4.37, b), precum și curbele de variație a ordinului izocromatelor (fig. 4.37, c). Unghiurile α (parametrii izoclinelor) precum și ordinul k al izocromatelor în punctele $1'$, $2'$, $3'$, ... și $1''$, $2''$, $3''$, ... de pe direcțiile AB respectiv CD, se trec de regulă într-un tabel (tabelul 4.2). Cu aceste valori se calculează tensiunile tangențiale în aceleași puncte, folosind relația (4.62) și apoi valorile medii $\tau_{yx}\Big|_{\frac{x_i+x_{i+1}}{2}}$ pentru mijlocul fiecărui interval, precum și valorile $\Delta\tau_{yx}$, scăzînd din valorile tensiunilor tangențiale din punctele situate pe segmentul AB, valorile tensiunilor tangențiale din punctele situate pe segmentul CD. Tensiunile σ_x și σ_y se determină apoi cu ajutorul relațiilor (4.65) și (4.66).

Tensiunile τ_{yx}, σ_x și σ_y din tabelul 4.2 au fost determinate mai întîi în funcție de ordinul izocromatei (coloanele 7, 12 și 14), iar apoi prin multiplicare cu $\sigma_0 = 15$ daN/cm². franje au fost calculate în daN/cm² (coloanele 13, 15, 16). În final, în coloanele 17 și 18 sînt date tensiunile principale σ_1 și σ_2 calculate cu relațiile (4.68).

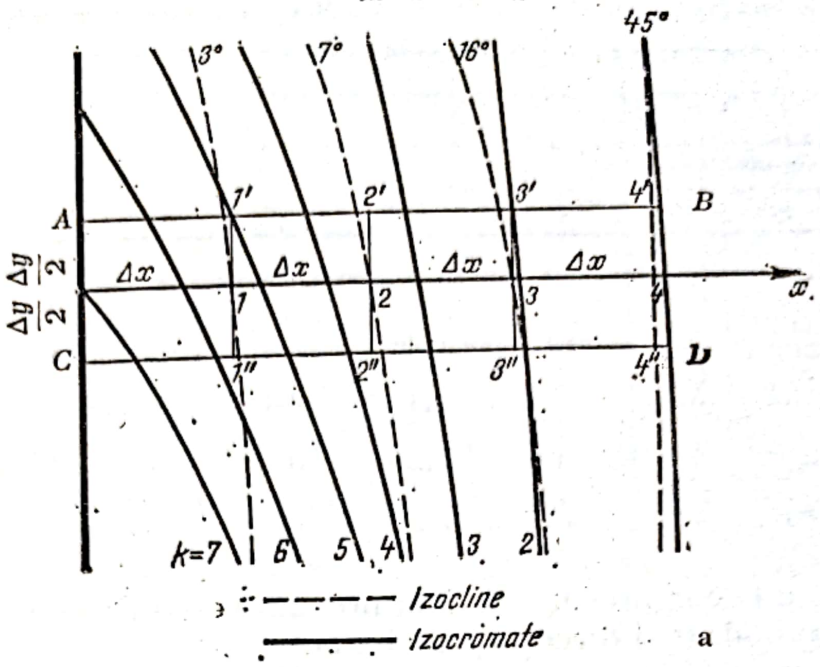
Datorită faptului că parametrii izoclinei diferă puțin pe cele două direcții AB și CD, în calcule s-au luat valorile medii, deci cele care corespund direcției Ox, aproximație justificată și de faptul că în zona studiată nu a fost posibilă determinarea exactă a poziției izoclinelor, acestea fiind difuze.

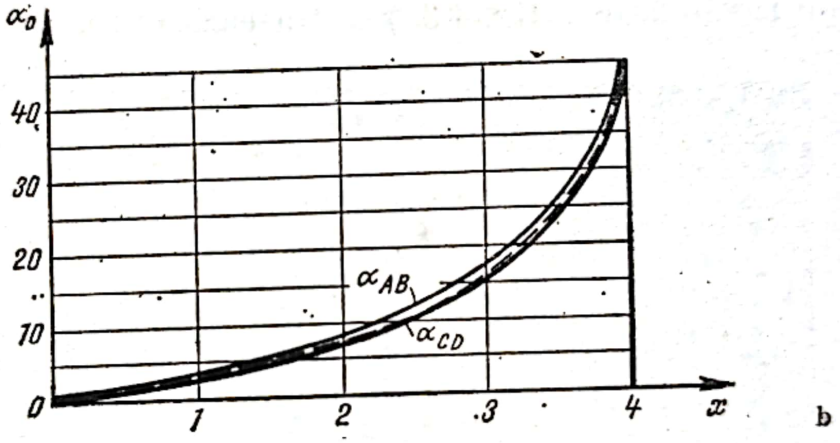
Precizia rezultatelor obținute prin metoda descrisă depinde de precizia cu care sînt înregistrate izoclinele și izocromatele deoarece erorile se cumulează. Deoarece în calcule nu sînt necesare decît izoclinele și izocromatele care, în general, se pot înregistra cu suficientă exactitate, metoda este relativ simplă iar precizia este comparabilă cu cea dată de alte metode, astfel că majoritatea autorilor o recomandă pentru separarea tensiunilor principale [6], [8], [9], [31].

4.5.4. METODA APROXIMATIVĂ „RAPID"

Metoda „Rapid", elaborată tot de Frocht [8], poate fi utilizată pentru separarea tensiunilor principale în secțiunile de simetrie în cazul barelor de secțiune dreptunghiulară cu crestături, sau cu găuri simetrice, solicitate

Scanned with OKEN Scanner





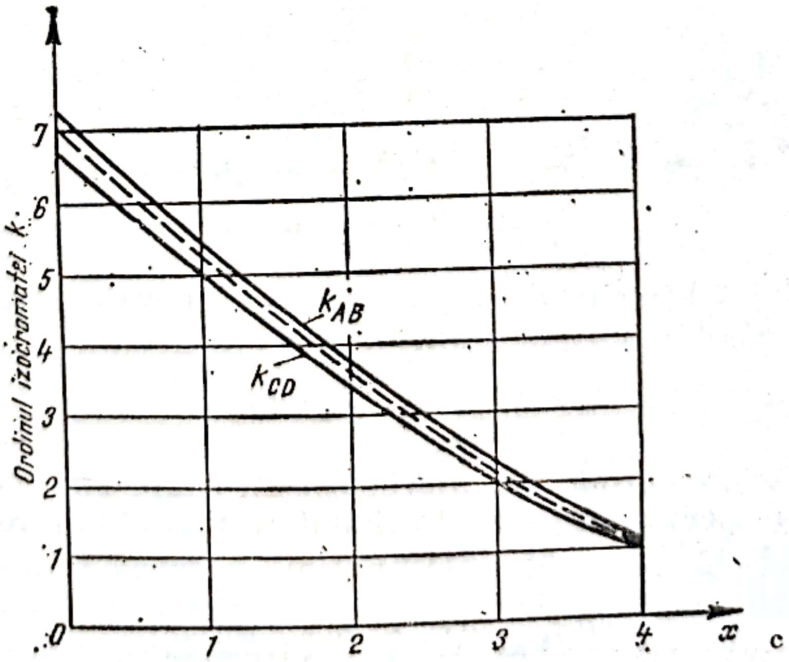


Fig. 4.37.

Scanned with OKEN Scanner

Sistematizarea calculelor pentru determinarea valorilor individuale ale tensiunilor principale

Nr.	$\sigma_1 - \sigma_2$			α	τ_{yx}			τ_{yx}	$\frac{x_i + x_{i+1}}{2}$
	ord. izocr.				ord. izocr.			ord. izocr.	
	AB	Ox	CD	Ox	AB	Ox	CD	AB	CD
0	6,8	7,0	7,2	0°	0	0	0		
1	5,0	5,2	5,4	3°	0,263	0,273	0,284	0,13	0,14
2	3,5	3,6	3,7	7°	0,425	0,436	0,447	0,34	0,36
3	2,0	2,05	2,1	16°	0,530	0,540	0,560	0,47	0,50
4	1,1	1,15	1,2	45°	0,550	0,575	0,600	0,54	0,58

la întindere sau la compresiune axială precum și la încovoiere pură. Aceste secțiuni corespund unei direcții principale.

Folosind izocromatele (fig. 4.38) se trasează curba de variație a dife-

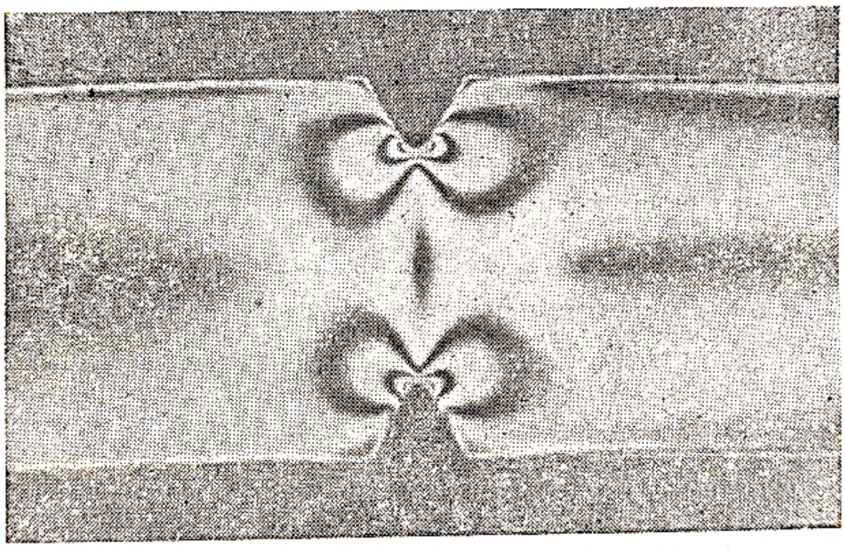


Fig. 4.38.

renței tensiunilor principale în secțiunea de simetrie (fig. 4.39).

Din identitatea

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_2) + \sigma_2 \tag{4.69}$$

rezultă relația între ordonatele curbelor, care reprezintă variația tensiunilor σ_1, σ_2, respectiv $\sigma_1 - \sigma_2$. Derivînd relația (4.69) rezultă și relația între pantele tangentelor la aceste curbe

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x} = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_2)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial x} \tag{4.70}$$

Scanned with OKEN Scanner

Sistematizarea calculelor pentru determinarea valorilor individuale ale tensiunilor principale

Nr.	$\sigma_1 - \sigma_2$			α	τ_{yx}			τ_{yx}	$\frac{x_i + x_{i+1}}{2}$
	ord. izocr.				ord. izocr.			ord. izocr.	
	AB	*Ox*	*CD*	*Ox*	*AB*	*Ox*	*CD*	*AB*	*CD*
0	6,8	7,0	7,2	0°	0	0	0		
1	5,0	5,2	5,4	3°	0,263	0,273	0,284	0,13	0,14
2	3,5	3,6	3,7	7°	0,425	0,436	0,447	0.34	0,36
3	2,0	2,05	2,1	16°	0,530	0,540	0,560	0,47	0,50
4	1,1	1,15	1,2	45°	0,550	0,575	0,600	0,54	0,58

la întindere sau la compresiune axială precum și la încovoiere pură. Aceste secțiuni corespund unei direcții principale.

Folosind izocromatele (fig. 4.38) se trasează curba de variație a dife-

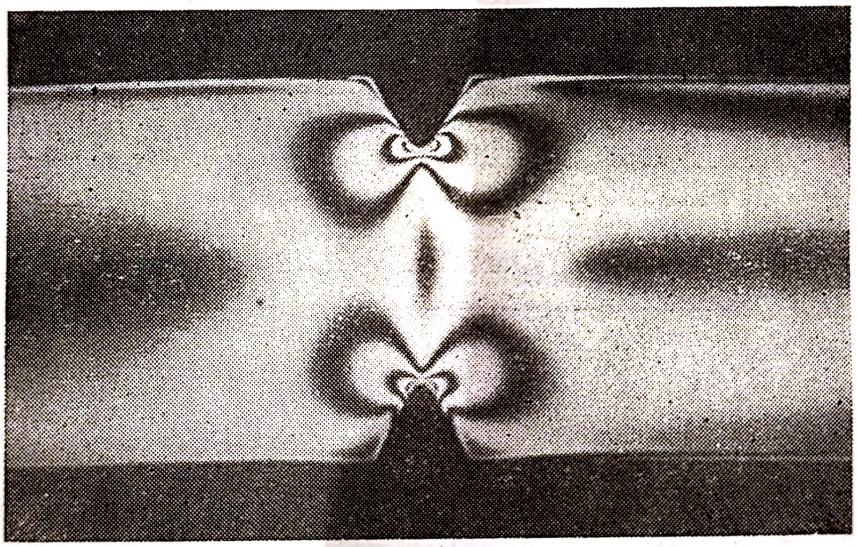


Fig. 4.38.

renței tensiunilor principale în secțiunea de simetrie (fig. 4.39).

Din identitatea

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_2) + \sigma_2 \tag{4.69}$$

rezultă relația între ordonatele curbelor, care reprezintă variația tensiunilor σ_1, σ_2, respectiv $\sigma_1 - \sigma_2$. Derivînd relația (4.69) rezultă și relația între pantele tangentelor la aceste curbe

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x} = \frac{\partial (\sigma_1 - \sigma_2)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial x} \tag{4.70}$$

Scanned with OKEN Scanner

folosind determinările fotoelastice (ordinul de bandă k și parametrul izoclinelor α)

Tabelul 4.2

$\Delta\tau_{yx}$	σ_x		σ_y		τ_{yx}	σ_1	σ_2
ord. izocr.	ord. izocr.	$\frac{daN}{cm^2}$	ord. izocr	$\frac{daN}{cm^2}$	$\frac{daN}{cm^2}$	$\frac{daN}{cm^2}$	$\frac{daN}{cm^2}$
	0	0	7,00	105	0	105	0
−0,011	−0,011	−0,165	5,20	78	4,1	78,12	− 0,28
−0,021	−0,032	−0,480	3,47	52	6,5	52,76	− 1,24
−0,023	−0,055	−0,825	1,67	25	8,1	27,33	−3,17
−0,040	−0,095	−1,425	−0,950	−1,45	8,6	7,164	−10,04

$$\sigma_0 = 15\ \frac{daN}{cm^2 \cdot franje}$$

sau, folosind notațiile din fig. 4.39,

$$\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\gamma. \tag{4.71}$$

Dacă se integrează relația (4.69) se obține relația care trebuie să existe între ariile mărginite de cele trei curbe

$$\int_0^a \sigma_1 dx = \int_0^a (\sigma_1 - \sigma_2)dx + \int_0^a \sigma_2 dx. \tag{4.72}$$

Ținînd seama și de condițiile pe contur, se obțin elemente suficiente pentru trasarea aproximativă a curbelor σ_1 și σ_2, care se corectează apoi verificînd îndeplinirea simultană a condițiilor date de relațiile (4.69), (4.70) și (4.72). Așa cum s-a arătat, pe un contur neîncărcat se pot separa tensiunile principale, una din tensiuni (cea normală la contur) fiind nulă. În aceste puncte se poate determina și unghiul γ dintre axa de simetrie și tangenta la curba de variație a tensiunii principale normală la contur.

Conturul liber fiind o izostatică, din ecuațiile Lamé-Maxwell [46] rezultă $\operatorname{tg}\gamma = \frac{\partial \sigma_2}{\partial s_2}$. Pentru un contur drept $\rho_1 = \infty$ și $\operatorname{tg}\gamma = 0$, iar pentru un contur cu raza de curbură r, $\rho_1 = r$ și se poate determina, de asemeni, $\operatorname{tg}\gamma$.

Construcția este ușurată dacă se cunosc în plus punctele în care tensiunea σ_2 are valori extreme. *Conform teoremei lui Mesnager* [20], [27], *o tensiune principală are un maxim în punctele în care izostatica și izoclina corespunzătoare se intersectează în unghi drept.*

Scanned with OKEN Scanner

În fig. 4.39 s-au trasat curbele σ_1 şi σ_2 pentru cazul din fig. 4.38 al unei bare de secţiune dreptunghiulară cu crestături laterale în „V", rotunjite la bază cu o rază de racordare ρ, solicitată la încovoiere pură.

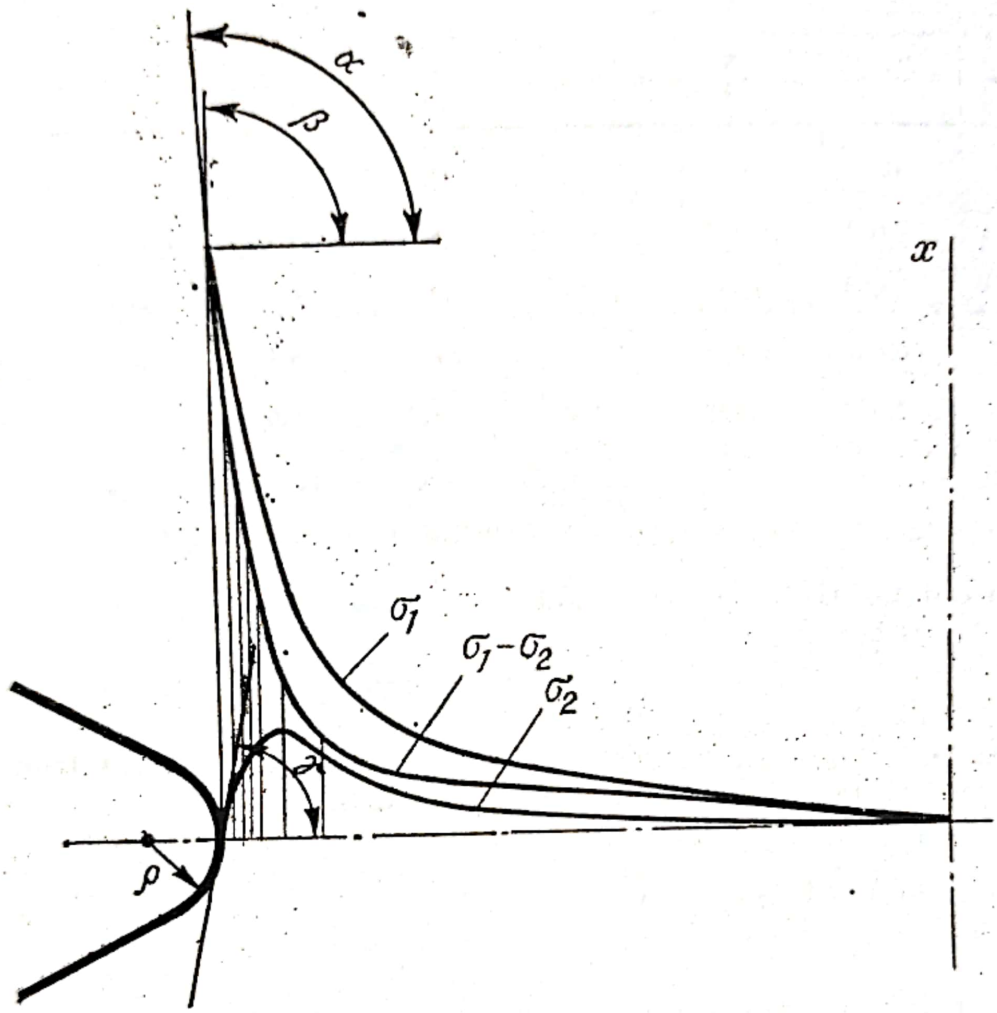


Fig. 4.39.

4.5.5. METODA DE INTEGRARE DE-A LUNGUL UNEI IZOSTATICE

Metoda constă în integrarea ecuaţiilor Lamé-Maxwell în lungul unei izostatice [20], [27]. Spre deosebire de metodele descrise în paragrafele precedente, la care era suficientă cunoaşterea izoclinelor şi a izocromatelor, la această metodă trebuie să se traseze izostaticele cu metoda descrisă în paragraful 4.4.2.

Considerînd o izostatică S_1 (fig. 4.40) care porneşte dintr-un punct O, situat pe contur, precum şi izostaticele de speţa a doua care o intersectează în punctele 1, 2, 3, ..., prin integrarea primei ecuaţii Lamé-Maxwell se obţine

$$\int_{s_{10}}^{s_{11}} \frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} \, ds_1 = -\int_{s_{10}}^{s_{11}} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_2} \, ds_1 \qquad (4.73)$$

sau, cu diferențe finite,

$$\sigma_1\Big|_{s_{11}} = \sigma_1\Big|_{s_{10}} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_2}\Big|_{\frac{s_{11}+s_{10}}{2}}. \tag{4.74}$$

Dacă se cunoaște tensiunea într-un punct S_{10} și valoarea medie a raportului $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_2}$ pe intervalul Δs_1, se poate calcula tensiunea $\sigma_1|_{s_{11}}$, în punctul S_{11} de pe izostatica S_1 (fig. 4.40).

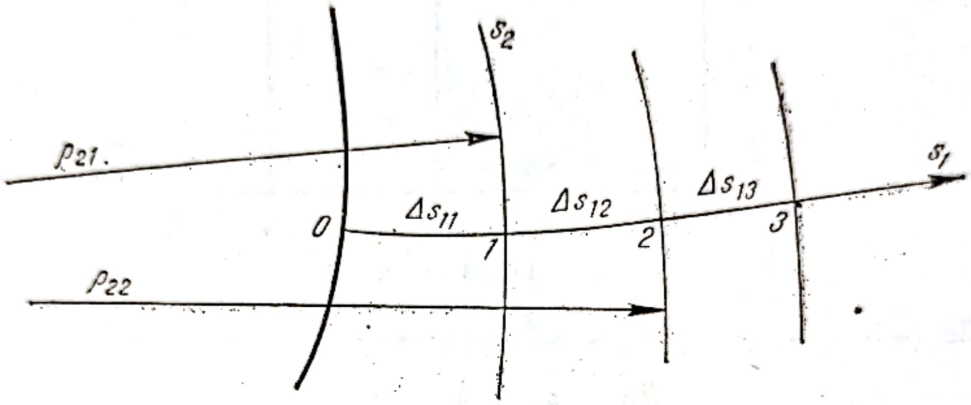


Fig. 4.40.

Raționamentul se repetă pentru punctele următoare. Dacă punctul inițial se ia pe un contur neîncărcat, valoarea $\sigma_1|_{s_{10}}$ se determină direct dacă se cunoaște ordinul izocromatei în acel punct cu relația cunoscută (4.55). De asemenea, diferența tensiunilor principale se determină tot din tabloul izocromatelor cu relația (4.63).

În cazul că prin punctul considerat nu trece nici o izocromată, ordinul k al izocromatei se poate determina prin interpolare, trasînd curba de variație a ordinului izocromatelor în lungul izostaticei alese. Mai dificilă este determinarea cu precizie a razelor de curbură ρ_2 ale izostaticelor de speța a doua. De aceea, așa cum se va vedea în paragrafele următoare, s-au căutat alte metode de integrare a ecuațiilor Lamé-Maxwell la care se utilizează unghiurile dintre izostatice și izocline.

Pentru efectuarea calculelor se poate folosi metoda tabelară, ca la metoda diferenței tensiunilor tangențiale, sau se reprezintă diagrama de variație a valorilor $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_2}$ și se planimetrează aria mărginită, Ω_i (fig. 4.41), care reprezintă valoarea integralei din membrul al doilea al relației (4.73).

Tensiunea într-un punct i, $\sigma_1|_{s_i}$ va fi dată de relația

$$\sigma_1|_{s_i} = \sigma_1|_{s_{10}} - \Omega_i. \tag{4.75}$$

4.5.6. METODA DE INTEGRARE DE-A LUNGUL UNEI IZOSTATICE FOLOSIND UNGHIUL DINTRE IZOCLINE ŞI IZOSTATICE

Ecuaţiile Lamé-Maxwell pot fi puse şi sub o altă formă, cea dată de Filon [20]. Dacă se consideră elementul limitat de două perechi de izostatice şi se scriu elementele de arc sub forma $ds_1 = \rho_1 d\alpha_1$, $ds_2 = \rho_2 d\alpha_2$

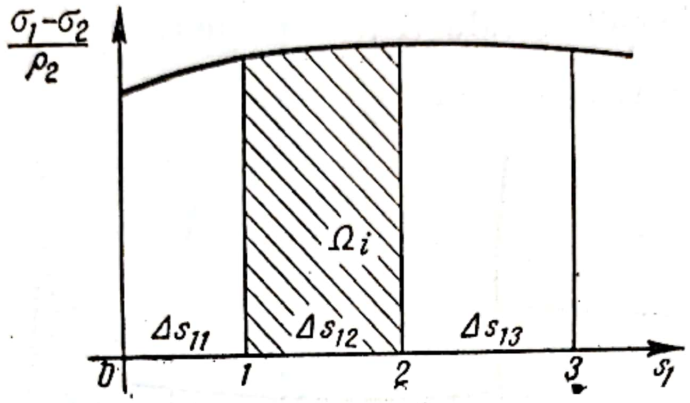


Fig. 4.41.

ecuaţiile (4.57) devin

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\rho_1}{\rho_2}(\sigma_1 - \sigma_2) = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial \alpha_2} + \frac{\rho_2}{\rho_1}(\sigma_1 - \sigma_2) = 0. \tag{4.76}$$

Fie α parametrul izoclinei care trece prin originea sistemului (fig. 4.42) şi $\alpha + \Delta\alpha$ parametrul izoclinei care trece prin punctul A. Unghiurile dintre tangentele la izostatice vor fi egale cu $\Delta\alpha$. Dacă se notează cu ψ unghiul dintre tangentele în O la izostatica S_1 şi la izoclină şi cu ψ' unghiul dintre tangenta în B la izostatica S_2 şi izoclină (fig. 4.42) pentru $\Delta s_1 = ds_1$ şi $\Delta s_2 = ds_2$ se poate considera că unghiul $\widehat{OAB} = 180° - \psi$, iar unghiul $\psi' = \psi - 90°$ şi deci

$$\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2} = \operatorname{ctg}(180° - \psi) = -\operatorname{ctg}\psi. \tag{4.77}$$

Dacă se exprimă Δs_1 şi Δs_2 sub forma $\Delta s_1 = \rho_1 \Delta\alpha$ şi $\Delta s_2 = \rho_2 \Delta\alpha$, relaţia (4.77) se mai poate scrie sub forma

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = -\operatorname{ctg}\psi. \tag{4.78}$$

Scanned with OKEN Scanner

De asemenea, din figura 4.42 mai rezultă și relația

$$\frac{\Delta s_2}{\Delta s_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \operatorname{ctg} \psi'. \tag{4.79}$$

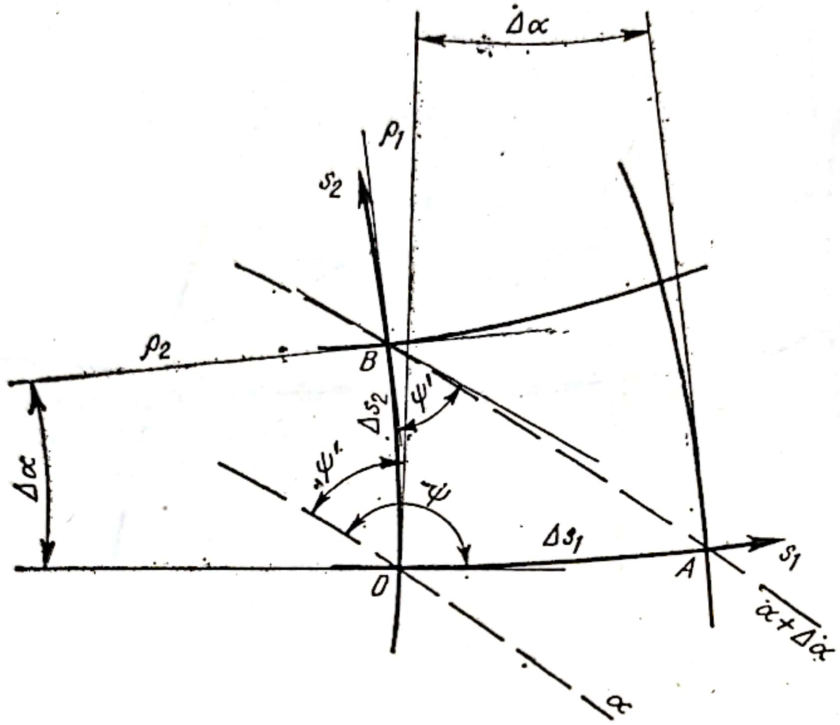


Fig. 4.42.

Ecuațiile (4.76) se pot scrie deci sub forma

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha} = (\sigma_1 - \sigma_2) \operatorname{ctg} \psi$$

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial \alpha} = -(\sigma_1 - \sigma_2) \operatorname{ctg} \psi'. \tag{4.80}$$

Prin integrare în lungul unei izostatice se obține

$$\int \frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha} d\alpha = \int (\sigma_1 - \sigma_2) \operatorname{ctg} \psi \, d\alpha$$

$$\int \frac{\partial \sigma_2}{\partial \alpha} d\alpha = -\int (\sigma_1 - \sigma_2) \operatorname{ctg} \psi' d\alpha \tag{4.81}$$

sau, cu diferențe finite,

$$\sigma_1|_{s_{11}} = \sigma_1|_{s_{10}} + (\sigma_1 - \sigma_2) \operatorname{ctg} \psi \cdot \Delta\alpha \Big|_{\frac{s_{11}+s_{10}}{2}} \tag{4.82}$$

Termenul $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ctg $\psi\Delta\alpha$ reprezintă valoarea medie a produsului pentru punctele S_{10} și S_{11}.

Pentru a aplica această metodă, se trasează în lugnul izostaticei izoclinele consecutive, al căror parametru diferă cu $\Delta\alpha$. În punctele de intersecție se determină ordinul izocromatei și unghiul dintre izostatică și

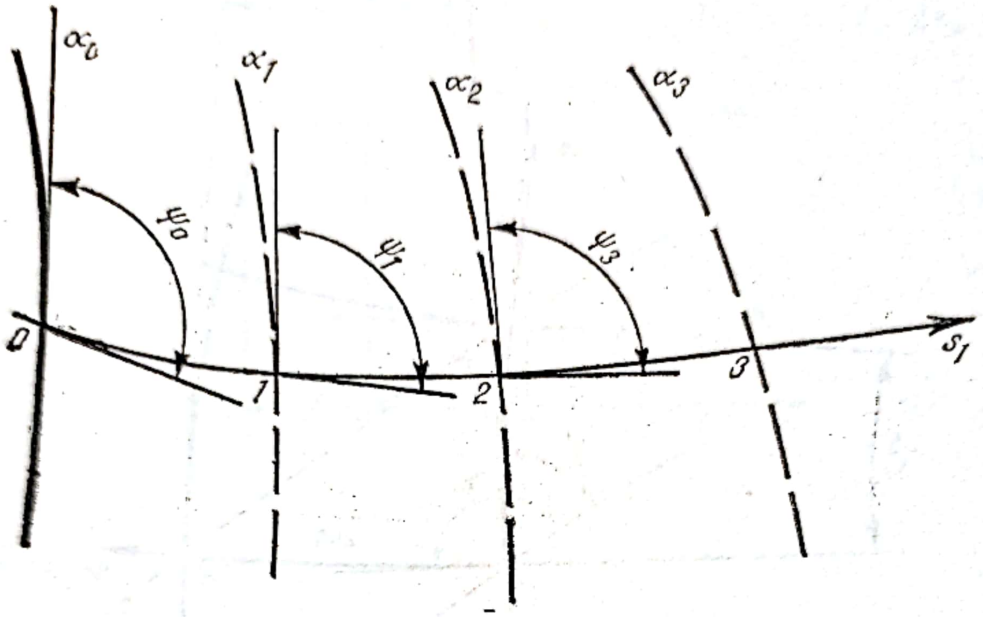


Fig. 4.43.

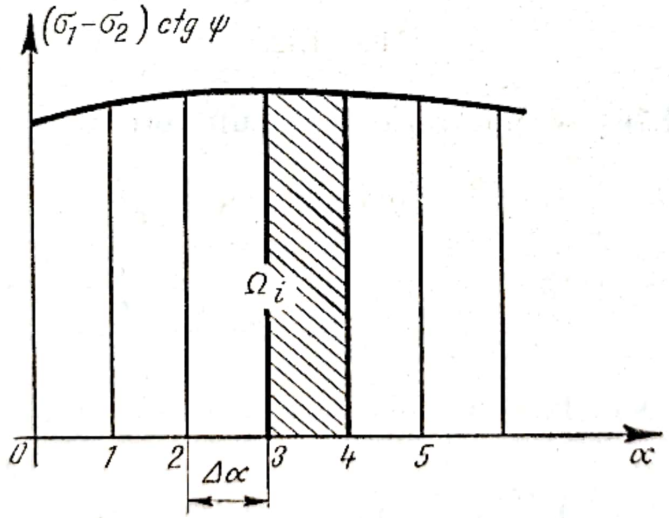


Fig. 4.44.

izoclină (fig. 4.43). Dacă punctul O se află pe contur, $\sigma_1|_{S_{10}}$ se poate calcula cunoscînd ordinul izocromatei și constanta fotoelastică a modelului cu relația (4.55).

Datele pot fi trecute într-un tabel, asemănător cu cel utilizat la metoda diferenței tensiunilor tangențiale, sau se poate trasa curba de variație a valorilor $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ctg ψ, în funcție de parametrul izoclinelor. Aria Ω_i mărginită de această curbă, (fig. 4.44), permite calculul tensiunilor principale

Scanned with OKEN Scanner

σ_1 într-un punct oarecare i cu relaţia

$$\sigma_1|_{s_{1i}} = \sigma_1|_{s_{10}} + \Omega_i \tag{4.83}$$

Metoda dă rezultate bune în cazul cînd unghiurile ψ au valori apropiate de 90°. În cazurile în care unghiurile sînt mici, deci izoclinele sînt aproape paralele cu izostatica, erorile la determinarea valorilor ctg ψ sînt mari. În aceste cazuri se recomandă folosirea metodei descrisă în paragraful următor.

4.5.7. A DOUA METODĂ DE INTEGRARE ÎN LUNGUL UNEI IZOSTATICE

Metoda a fost elaborată tot de Filon [8], [27] şi se poate aplica în cazul secţiunilor de simetrie, care sînt şi izostatice şi în lungul cărora unghiurile ψ dintre izocline şi izostatice sînt mici. Ecuaţiile Lamé-Maxwell se pun sub următoarea formă, ţinînd seama de relaţiile dintre elementele de arc, razele de curbură şi parametrul izoclinei

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} + (\sigma_1 - \sigma_2)\frac{\partial \alpha}{\partial s_2} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_2}{\partial s_2} + (\sigma_1 - \sigma_2)\frac{\partial \alpha}{\partial s_1} &= 0. \end{aligned} \tag{4.84}$$

Integrînd prima dintre aceste ecuaţii se obţine

$$\int \frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} ds_1 = -\int (\sigma_1 - \sigma_2)\frac{\partial \alpha}{\partial s_2} ds_1 \tag{4.85}$$

sau, trecînd la diferenţe finite, tensiunea principală în punctul 1 este dată de relaţia

$$\sigma_1\Big|_{s_{11}} = \sigma_1\Big|_{s_{10}} - (\sigma_1 - \sigma_2)\frac{\Delta\alpha}{\Delta s_2}\Delta s_1\Big|_{\frac{s_{11}+s_{10}}{2}} \tag{4.86}$$

în care termenul $(\sigma_1 - \sigma_2)\dfrac{\Delta\alpha}{\Delta s_2}\Delta s_1\Big|_{\frac{s_{10}+s_{11}}{2}}$ este valoarea medie a produsului termenilor în punctele S_{10} şi S_{11} (fig. 4.45).

Ca şi în cazurile precedente se porneşte de pe un contur neîncărcat, în care se cunoaşte valoarea tensiunii principale, iar intervalele Δs_1 se pot lua egale. În punctele $O, 1, 2, \ldots$ se determină ordinul izocromatelor şi lungimea arcului de izostatică s_2 limitat de două izocline succesive. Pentru

Scanned with OKEN Scanner

o precizie satisfăcătoare parametrul izoclinelor trebuie să varieze cu mai puțin de 5° ($\Delta\alpha = 5°$). Aplicînd metoda tabelară se pot calcula succesiv tensiunile principale în punctele *0*, *1*, *2*, ... De asemenea, se poate repre-

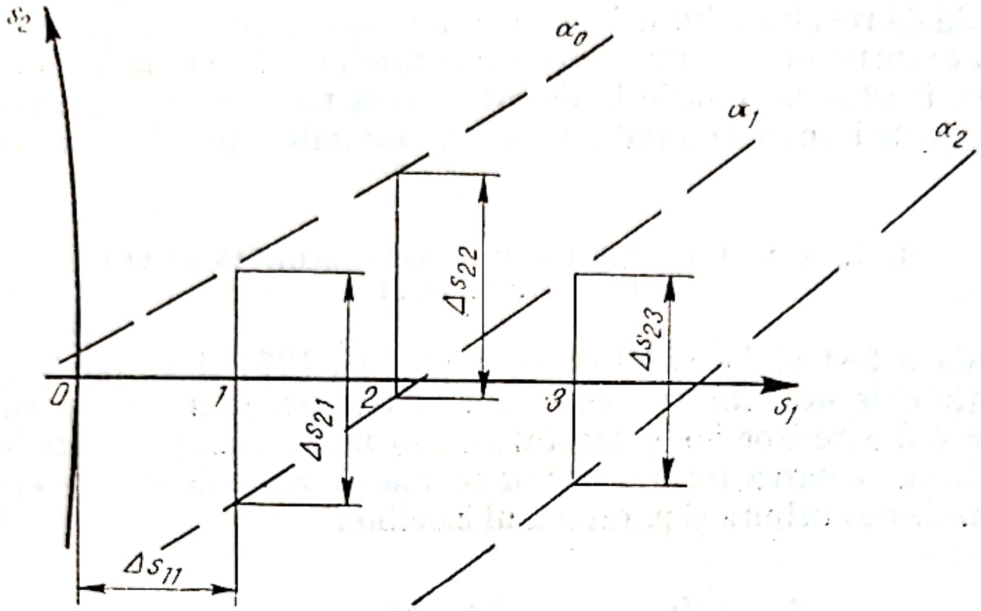


Fig. 4.45.

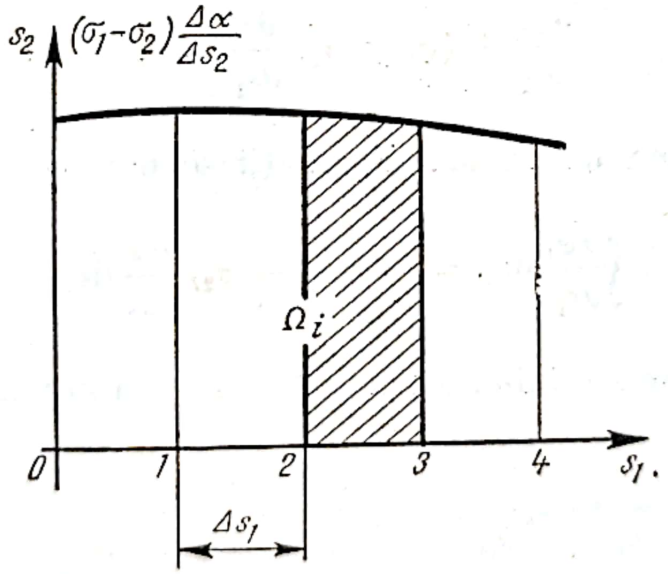


Fig. 4.46.

zenta curba de variație a valorilor $(\sigma_1 - \sigma_2)\dfrac{\Delta\alpha}{\Delta s_2}$ în lungul izostaticei și să se planimetreze aria mărginită, Ω_i (fig. 4.46).

Tensiunea principală σ_1 într-un punct i se poate calcula cu relația

$$\sigma_1|_{s_{1i}} = \sigma_1|_{s_{10}} - \Omega_i. \tag{4.87}$$

Scanned with OKEN Scanner

4.5.8. METODA INCIDENȚEI OBLICE

După cum s-a arătat, atunci cînd un model fotoelastic plan este traversat prin incidență normală de un fascicul de lumină polarizată, legătura dintre diferența tensiunilor principale și ordinul de bandă într-un punct P, este dată de relația (4.45). Ținînd seama de (4.45) și (4.46) se poate scrie

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k \frac{\sigma_0'}{h} \tag{4.88}$$

sau notînd

$$A_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_0'} h \quad \text{și} \quad A_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_0'} h \tag{4.89}$$

rezultă

$$A_1 - A_2 = k. \tag{4.90}$$

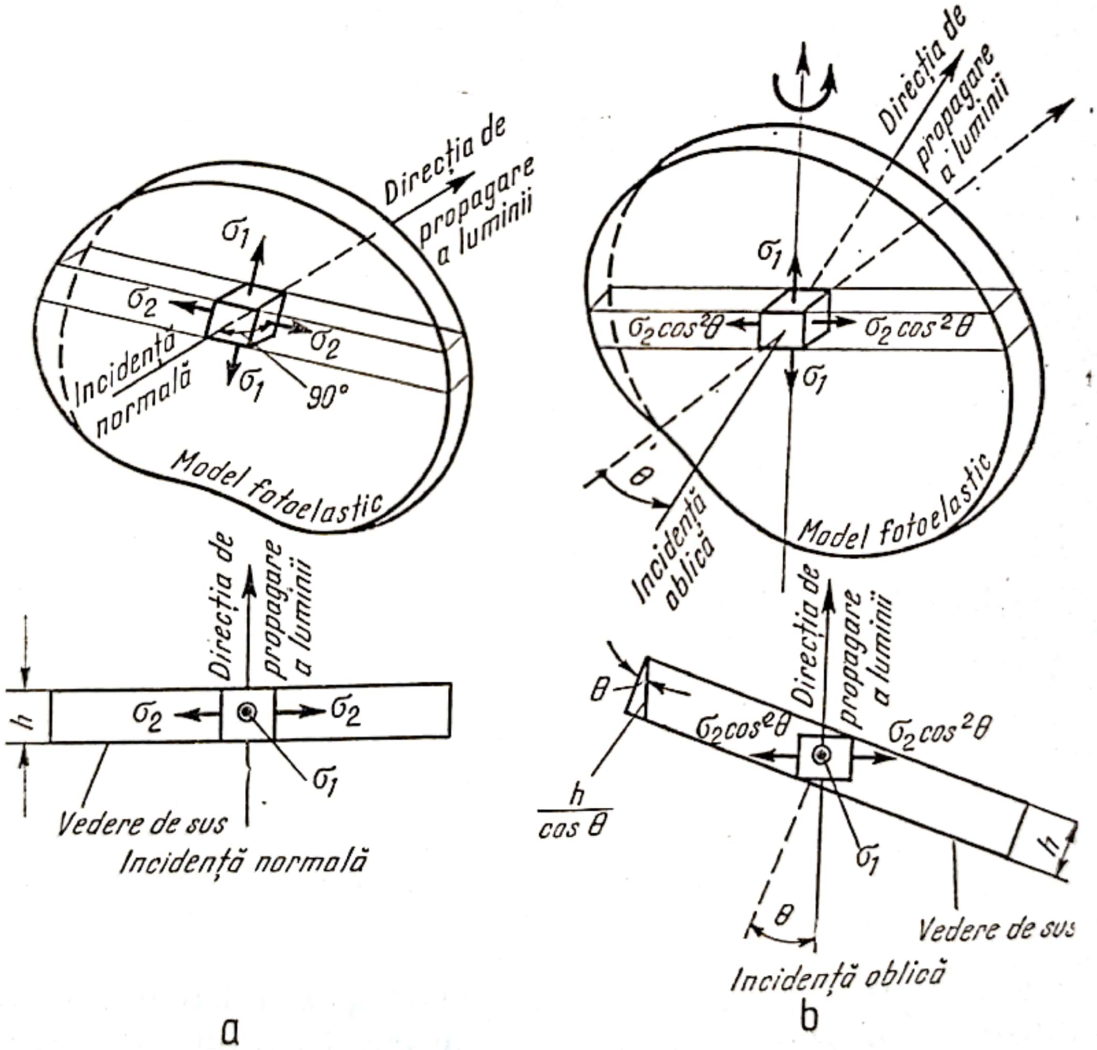


Fig. 4.47.

Considerînd tensiunea principală $\sigma_3 = 0$, se rotește modelul fotoelastic cu unghiul θ în jurul direcției tensiunii principale σ_1 (fig. 4.47).

Lungimea drumului parcurs de lumină prin model în acest caz va fi $h/\cos\theta$, iar tensiunile principale din palnul principal pe direcția de

propagare a luminii sînt σ_1 și $\sigma_2 \cos^2 \theta$. Înlocuind aceste valori în expresia (4.88) și notînd cu k_1 ordinul de bandă, determinat în același punct P, prin incidență oblică, se obține

$$k_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2 \cos^2 \theta}{\sigma_0'} \cdot \frac{h}{\cos \theta}$$

sau ținînd seama de (4.89) se mai poate scrie

$$k_1 = \frac{A_1 - A_2 \cos^2 \theta}{\cos \theta}. \tag{4.91}$$

Din (4.90 și (4.91) se obține

$$A_1 = \frac{\cos \theta (k_1 - k \cos \theta)}{\sin^2 \theta}$$

$$A_2 = \frac{k_1 \cos \theta - k}{\sin^2 \theta} \tag{4.92}$$

iar din (4.89) rezultă

$$\sigma_1 = \frac{\cos \theta \, (k_1 - k \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{\sigma_0'}{h}$$

$$\sigma_2 = \frac{k_1 \cos \theta - k}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{\sigma_0'}{h}$$

sau ținînd seama de (4.46) se obține

$$\sigma_1 = \frac{\cos \theta \, (k_1 - k \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_2 = \frac{k_1 \cos \theta - k}{\sin^2 \theta} \cdot \sigma_0 \,. \tag{4.93}$$

În felul acesta, cu ajutorul expresiilor (4.93) pot fi determinate valorile individuale ale tensiunilor σ_1 și σ_2 într-un punct P, atunci cînd se cunosc valorile ordinelor de bandă înregistrate în acest punct prin cele două moduri de incidență (normală și oblică) și unghiul cu care se rotește modelul.

Dacă modelul se rotește în jurul direcției tensiunii principale σ_2, notînd cu k_2 ordinul de bandă citit în acest caz în punctul P, valorile

Scanned with OKEN Scanner

individuale ale tensiunilor principale vor fi date de următoarele expresii care se deduc asemănător

$$\sigma_1 = \frac{k - k_2 \cos\theta}{\sin^2\theta} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_2 = \frac{\cos\theta\,(k\cos\theta - k_2)}{\sin^2\theta} \cdot \sigma_0 \,. \tag{4.94}$$

După cum s-a mai putut observa, pentru determinarea valorilor individuale ale tensiunilor principale într-un punct din model, este necesar să se cunoască în prealabil direcţiile acestor tensiuni în punctul considerat. Pentru a obţine o diferenţă cît mai mare între ordinele de bandă (k şi k_1) citite prin cele două moduri de incidenţă, se recomandă să se lucreze cu unghiuri de incidenţă ale luminii cît mai mari. Uneori mărimea unghiului de incidenţă este limitată de neclaritatea franjelor, care apar estompate în zonele în care gradientul tensiunilor este ridicat. Alegerea acestui unghi se face în funcţie de geometria modelului şi modul de încărcare, astfel ca franjele observate prin incidenţă oblică să apară cît mai clare. În aplicarea acestei metode trebuie să se ţină seama de fenomenul de refracţie care apare la intrarea şi ieşirea luminii din model. Neglijarea fenomenului de refracţie poate uneori să conducă la erori importante în determinarea valorilor individuale ale tensiunilor. De aceea pentru eliminarea acestui efect, mai ales în cazul în care se lucrează cu unghiuri mari de incidenţă, se recomandă introducerea modelului fotoelastic într-o cuvă cu pereţi transparenţi în care se află un lichid cu indicele de refracţie egal cu cel al materialului fotoelastic. Cuva trebuie să aibă pereţii plani, iar lumina polarizată să intre în cuvă prin incidenţă normală.

În practica experimentală, pentru determinarea tensiunilor principale prin incidenţă oblică, uneori se mai folosesc polariscoape construite special [19], care utilizînd metoda lui Favre, măsoară întîrzierea dintre cele două componente ale luminii care traversează modelul prin incidenţă oblică. Acest tip de polariscop prezintă desavantajul că reduce analiza fotoelastică obişnuită la o analiză punct cu punct.

4.6. SEPARAREA TENSIUNILOR PRINCIPALE PRIN ALTE METODE

În afară de metodele care folosesc numai datele fotoelastice pentru determinarea valorilor individuale ale tensiunilor principale, prezentate în paragraful 4.5, în multe probleme datele determinărilor fotoelastice sînt completate cu date furnizate de alte metode sau tehnici tensometrice. Fiecare metodă prezintă particularităţile ei şi are un anumit domeniu de aplicabilitate, astfel încît adoptarea uneia sau alteia dintre ele depinde în primul rînd de felul problemei, de experienţa şi priceperea celui care urmează să o aplice.

Scanned with OKEN Scanner

Întrucît aceste metode sînt dezvoltate pe larg în cadrul altor capitole din lucrarea de faţă, în cele ce urmează se va insista numai asupra utilizării datelor experimentale pe care le furnizează, ca date suplimentare, necesare în fotoelasticitate pentru o analiză completă a stării de tensiune.

4.6.1. METODA LACURILOR CASANTE

Ca şi fotoelasticitatea metoda lacurilor casante permite vizualizarea cîmpului de tensiune prin fisurile care se formează pe suprafaţa modelului acoperit cu lac, atunci cînd se aplică încărcarea.

În acest caz modelul care urmează să fie studiat se acoperă cu un lac special care prin întărire formează o peliculă subţire casantă. Prin încărcare, modelul se deformează şi o dată cu acesta se deformează şi pelicula subţire de lac. Tensiunile de întindere din stratul de lac depăşind limita de rupere a lacului, pe suprafaţa modelului apar o serie de fisuri. Aceste fisuri sînt orientate pe direcţii perpendiculare faţă de direcţiile tensiunilor principale de întindere σ_1. Mărimea tensiunilor principale de întindere σ_1 care produc fisurarea lacului se calculează (vezi cap. 7) cu următoarea relaţie aproximativă [6], acceptată de majoritatea cercetătorilor din acest domeniu

$$\sigma_{1_m} = E_m \, \varepsilon_0 \tag{4.95}$$

unde σ_{1_m} este tensiunea principală din model în dreptul fisurii, E_m este modulul de elasticitate longitudinal al materialului modelului, iar ε_0 este pragul de deformaţie al lacului. Prin prag de deformaţie se înţelege valoarea minimă a deformaţiei care declanşează procesul de fisurare a lacului cînd modelul este supus unei stări uniaxiale de tensiune.

Expresia (4.95) este folosită în majoritatea investigaţiilor care se fac cu lacuri casante, fiind extrem de simplă şi în acelaşi timp suficient de exactă. Această relaţie a fost stabilită în ipoteza că grosimea stratului de lac fiind mult mai mică decît grosimea modelului, tensiunile din model se transmit lacului integral, fără nici o modificare sau atenuare. Expresia (4.95) este însă aproximativă, deoarece consideră că procesul de fisurare este produs de o stare uniaxială de tensiune, deşi în realitate stratul de lac este supus unei stări plane de solicitare.

În felul acesta aplicînd tehnica lacurilor casante pe un model acoperit cu o peliculă de lac, se pot determina tensiunile principale de întindere σ_1 cu relaţia (4.95). Pe de altă parte, cu ajutorul fotoelasticităţii se determină valorile diferenţei tensiunilor principale $\sigma_1 - \sigma_2$. Din aceste două serii de determinări se obţin cu uşurinţă valorile individuale ale tensiunilor principale, σ_1 şi σ_2.

4.6.2. METODA REŢELELOR

O metodă simplă pentru separarea tensiunilor principale obţinut e pe cale fotoelastică, este de a determina suma deformaţiilor principale în punctele de interes. Este cunoscut că suma deformaţiilor principale

Scanned with OKEN Scanner

este proporţională cu suma tensiunilor normale corespunzătoare σ_x şi σ_y. De asemenea se cunoaşte că suma tensiunilor normale este un invariant, fiind egală cu suma tensiunilor principale σ_1 şi σ_2.

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y = \frac{E}{1-\mu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y). \tag{4.96}$$

Din relaţia (4.45) s-a văzut că

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k\,\sigma_0.$$

Cunoscînd suma şi diferenţa tensiunilor principale se pot calcula valorile individuale ale acestor tensiuni prin adunarea, respectiv scăderea expresiilor (4.96) şi (4.45), rezultînd

$$\sigma_1 = \frac{E}{2(1-\mu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + k\sigma_0$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{2(1-\mu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - k\sigma_0 . \tag{4.97}$$

Deformaţiile specifice ε_x şi ε_y pe două direcţii perpendiculare pot fi determinate prin mai multe metode. Una dintre cele mai vechi metode folosită în analiza experimentală a stării de deformaţie este metoda reţelelor. Metoda necesită trasarea unei reţele de linii rectangulare pe suprafaţa modelului. Reţeaua imprimată se fotografiază înainte şi după încărcarea modelului, suprapunîndu-se cele două expuneri pe acelaşi negativ, fără ca modelul să se mişte între cele două expuneri. Măsurînd deformaţia reţelei pe două direcţii în dreptul fiecărui nod, se determină deformaţiile specifice ε_x şi ε_y în aceste puncte, care apoi introduse în expresiile (4.97) împreună cu datele fotoelastice permit calcularea valorilor tensiunillor principale σ_1 şi σ_2. Pentru măsurarea cît mai exactă a celor două deformaţii se recomandă utilizarea unor dispozitive optice de citire. Deoarece deformaţiile care urmează să fie măsurate sînt foarte mici, în majoritatea cazurilor citirile se fac cu precizie insuficientă, chiar şi atunci cînd se folosesc mijloace optice şi acurateţea determinărilor se reduce sub limite rezonabile. De aceea această metodă se foloseşte foarte rar pentru analiza stării de deformaţie în domeniul elastic numai în cazurile unde intervin deformaţii foarte mari. Metoda este practică pentru determinarea deformaţiilor mari, care depăşesc 5%, cum sînt cele care apar în cazul solicitărilor în domeniul neelastic.

4.6.3. EXTENSOMETRE LATERALE

Se consideră un element de volum dintr-un model fotoelastic de grosime h (fig. 4.48). Modelul fiind supus unei stări plane de solicitare, pe feţele elementului vor acţiona tensiunile principale σ_1 şi σ_2 cuprinse

Scanned with OKEN Scanner

în planul modelului. Tensiunea perpendiculară pe planul modelului care are aceeaşi direcţie cu lumina care traversează modelul este $\sigma_3 = 0$. După cum este cunoscut, această stare plană de tensiune este asociată unei stări spaţiale de deformaţie caracterizată de deformaţiile specifice

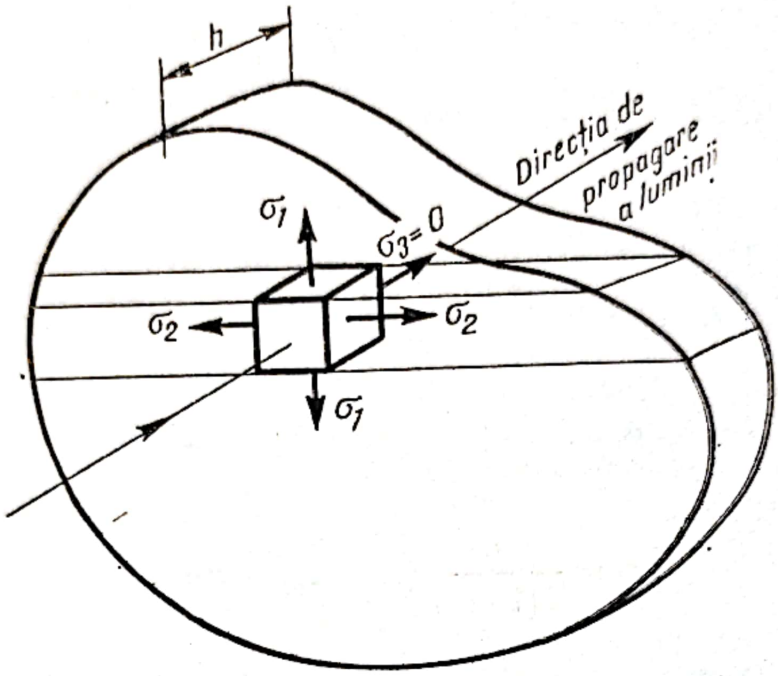


Fig. 4.48.

ε_1, ε_2, şi ε_3, în care

$$\varepsilon_3 = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2). \tag{4.98}$$

Deformaţia specifică a modelului pe direcţia de propagare a luminii se exprimă prin relaţia

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta h}{h} \tag{4.99}$$

Δh fiind variaţia grosimii modelului prin încărcare.

Din expresiile (4.98) şi (4.99) rezultă

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -k\frac{\Delta h}{h} \tag{4.100}$$

unde $k = \frac{E}{\mu}$ este o constantă de proporţionalitate care depinde de proprietăţile elastice ale materialului modelului.

Cunoscînd constantele elastice ale materialului şi grosimea modelului, măsurînd variaţia grosimii modelului într-un punct, după încărcare, se poate determina suma tensiunilor principale cu relaţia (4.100).

Scanned with OKEN Scanner

În aplicațiile obișnuite de fotoelasticitate, deplasările care trebuiesc măsurate fiind foarte mici, pentru obținerea unor rezultate acceptabile, sînt necesare instrumente de măsură cu sensibilitate ridicată, capabile să înregistreze variații de grosime de ordinul 10^{-5} cm. De aceea aceste instrumente sînt prevăzute cu traductoare foarte sensibile cum sînt traductoarele interferometrice sau cele tensometrice rezistive. Înainte de a se face determinările, instrumentele de măsură trebuie etalonate pe același material din care este confecționat modelul. Metoda prezintă dezavantajul că cele mai mici variații ale presiunii pe suprafața de contact în punctele de măsură, conduc la erori apreciabile în determinarea sumei tensiunilor principale.

4.6.4. METODE NUMERICE PENTRU CALCULUL SUMEI TENSIUNILOR PRINCIPALE

După cum s-a arătat în capitolele precedente, în cazul stării plane de solicitare, suma tensiunilor principale este o funcție care depinde de coordonatele punctului.

Suma tensiunilor principale

$$\Phi = \sigma_1 + \sigma_2 \tag{4.101}$$

este o funcție armonică, deoarece satisface ecuația lui Laplace

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0. \tag{4.102}$$

În cazul în care valorile funcției Φ sînt cunoscute pe conturul unui domeniu oarecare, ecuația lui Laplace admite o soluție unică și prin urmare funcția Φ se poate determina în orice punct din interiorul domeniului.

Rezolvarea acestei probleme pe cale analitică este posibilă doar pentru cîteva cazuri particulare simple. În cazul domeniilor mărginite de contururi complicate, problema poate fi soluționată cu ajutorul diferențelor finite.

Pentru o rețea de puncte de parametrii Δx și Δy (fig. 4.49), ecuația lui Laplace scrisă în diferențe finite [44], capătă următoarea formă

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{\Phi_3 - 2\Phi_0 + \Phi_1}{\Delta x} + \frac{\Phi_4 - 2\Phi_0 + \Phi_2}{\Delta y} = 0, \tag{4.103}$$

unde $\Phi_0, \ldots, \Phi_4$, sînt valorile funcției de tensiune în nodurile rețelei.

Dacă $\Delta x = \Delta y$, expresia (4.103) devine

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 = 4\Phi_0 \tag{4.104}$$

de unde

$$\Phi_0 = \frac{1}{4}(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4). \tag{4.105}$$

Scanned with OKEN Scanner

Prin urmare, valoarea Φ_0 a funcţiei Φ într-un punct din interiorul domeniului este egală cu media valorilor funcţiei în patru puncte vecine echidistante aşa cum rezultă din fig. 4.49.

Dacă distanţa dintre diferitele noduri ale reţelei nu este egală (fig. 4.50), urmînd aceeaşi cale, se poate stabili o expresie asemănătoare cu expresia (4.104)

$$k_1\Phi_1 + k_2\Phi_2 + k_3\Phi_3 + k_4\Phi_4 = \Phi_0 \tag{4.106}$$

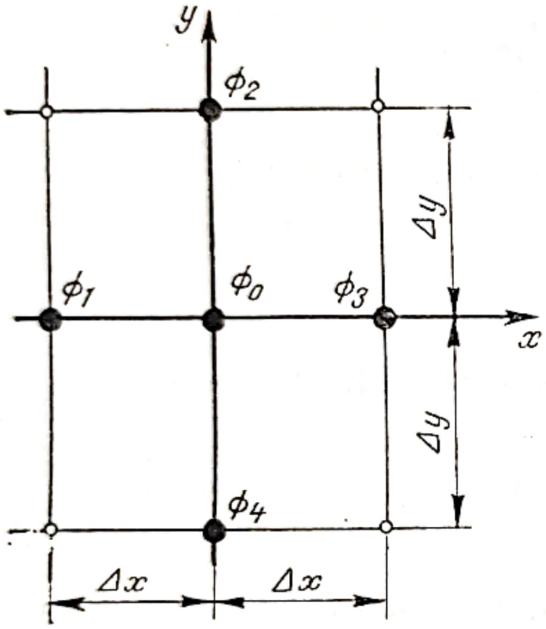


Fig. 4.49.

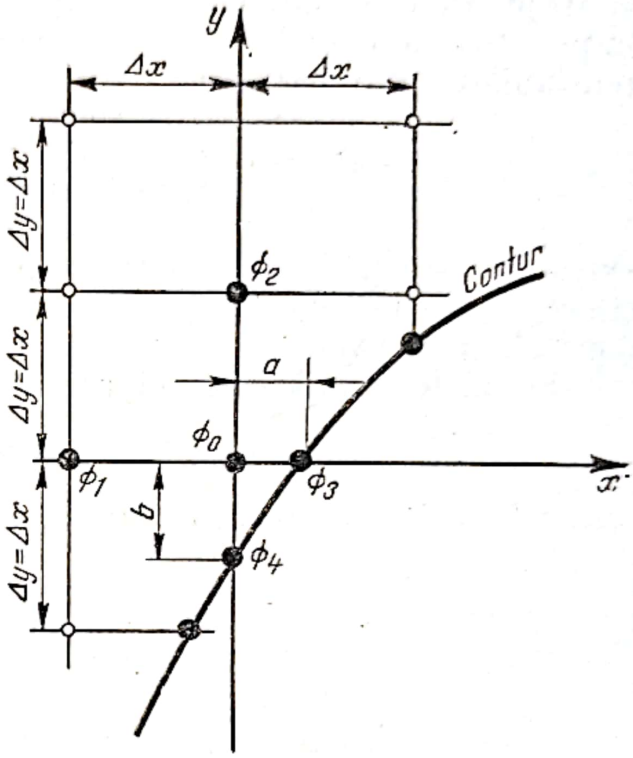


Fig. 4.50.

unde $k_1,\ldots,k_4$, sînt constante care depind de distanţa de la punctul considerat pînă la punctele vecine.

Pentru cazul din fig. 4.50, constantele au următoarele expresii [7]

$$k_1 = \frac{a\,b}{(a+b)(\Delta x + a)}$$

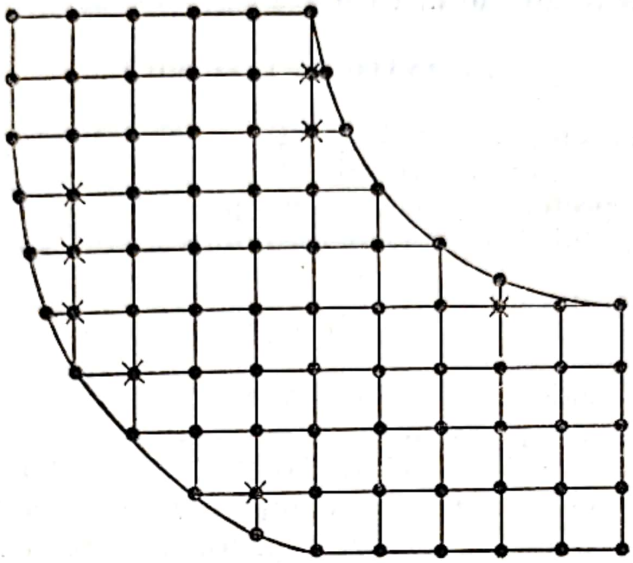
$$k_2 = \frac{ab}{(a+b)(\Delta x + b)}$$

$$k_3 = \frac{b\Delta x}{(a+b)(\Delta x + a)}$$

$$k_4 = \frac{a\,\Delta x}{(a+b)(\Delta x + b)}. \tag{4.107}$$

Scanned with OKEN Scanner

Practic, domeniul care urmează să fie studiat se împarte într-un număr de pătrate (ochiuri), printr-o rețea de drepte rectangulare. Pentru simplificarea calculelor rețeaua trebuie trasată în așa fel încît să se



• *Se aplică ecuația (4.104)*
✱ *Se aplică ecuația (4.106)*

Fig. 4.51.

obțină un număr minim de puncte aflate la distanțe neegale în vecinătatea conturului (fig. 4.51).

Ținînd seama de faptul că pe un contur neîncărcat, tensiunea principală normală la contur este nulă ($\sigma_2 = 0$), valoarea funcției pe contur este

$$\Phi_c = \sigma_1.$$

Scriind pentru fiecare punct din interiorul domeniului ecuația (4.104) sau ecuația (4.106) (pentru punctele aflate la distanțe neegale), se obține un sistem de n ecuații liniare cu n necunoscute, unde n este numărul nodurilor din interiorul domeniului. Rezolvarea acestui sistem de ecuații liniare reprezintă un exercițiu simplu de programare care poate fi făcut fără dificultăți pe orice calculator. Valorile funcției de tensiune astfel determinate împreună cu datele obținute din determinările fotoelastice, permit calcularea valorilor individuale ale tensiunilor principale σ_1 și σ_2.

Sistemul de ecuații rezultat mai poate fi soluționat și cu ajutorul metodelor numerice de calcul [44] (metoda iterației, relaxarea, etc). Aceste metode necesită mult timp pentru rezolvare și multă îndemînare din partea celui care le folosește, mai ales în cazul rețelelor cu multe noduri.

Soluțiile care se obțin la rezolvarea ecuației Laplace prin diferențe finite sînt aproximative. Cu cît este mai fină rețeaua folosită cu atît se

Scanned with OKEN Scanner

face o aproximare mai bună a soluţiilor. Aceasta presupune însă un număr mare de noduri şi deci un număr mare de ecuaţii care trebuiesc rezolvate. În practică pentru simplificarea calculelor se obişnuieşte să se îndesească reţeaua în zonele în care gradientul tensiunilor este ridicat.

4.6.5. ANALOGIA ELECTRICĂ

Este o metodă simplă şi utilă pentru obţinerea izopachelor necesare în calculul valorilor individuale ale tensiunilor principale. Utilizînd un echipament puţin pretenţios şi accesibil pentru oricine, această metodă prezentată în capitolul 6 permite determinarea funcţiei

$$\Phi = \sigma_1 + \sigma_2$$

în orice punct din model cu mare precizie.

Metoda se bazează pe analogia care există între cîmpul de tensiune produs într-o piesă de o anumită încărcare şi cîmpul de potenţial electric dintr-un mediu conductor omogen, supus unor diferenţe de tensiune.

După cum este cunoscut, (vezi cap. 6), în cazul contururilor lipsite de încărcare, respectiv de surse de curent, cele două funcţii Φ şi V, satisfac ecuaţia lui Laplace. Într-un domeniu cu două dimensiuni acest lucru se scrie astfel

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0.$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0. \qquad (.103)$$

De aici rezultă că funcţia Φ dintr-un domeniu oarecare poate fi modelată cu ajutorul funcţiei de potenţial V. Modelarea se poate face fie într-o cuvă electrolitică folosind apa de la robinet drept mediu conductor, fie pe hîrtie grafitată cum este hîrtia „Teledeltos". Şi într-un caz şi în celălalt, modelul electric se obţine izolînd din mediul conductor folosit un domeniu avînd aceeaşi formă cu modelul fotoelastic. Pe conturul modelului astfel obţinut se aplică prin intermediul unor ploturi, potenţiale proporţionale cu diferenţa tensiunilor principale determinate pe conturul modelului pe cale fotoelastică. În cazul folosirii hîrtiei grafitate, este util să se cunoască rezistenţa electrică specifică. De regulă aceasta este indicată de firma producătoare. Astfel hîrtie „Teledeltos" se livrează sub două calităţi avînd rezistenţa electrică specifică 3000 Ω/cm^2 şi respectiv 12 000Ω/cm^2. Modelul electric avînd potenţiale aplicate pe contur se inspectează cu o sondă, determinîndu-se potenţialul fiecărui punct din interior cu ajutorul unui milivoltmetru. Unind punctele care au acelaşi potenţial (grad V = = ct) se obţine o familie de curbe numite echipotenţiale. Deoarece funcţia de potenţial V, modelează funcţia Φ aceste curbe reprezintă şi locul geometric al punctelor în care $\sigma_1 + \sigma_2 =$ ct, adică sînt izopache.

Scanned with OKEN Scanner

În fig. 4.52 se reprezintă schema instalaţiei folosite pentru determinarea izopachelor utilizînd analogia electrică de cîmp pe hîrtie grafitată.

Prin intermediul unui divizor de tensiune, se aplică pe conturul modelului potenţialele

$$V_c = C\sigma_c \tag{4.109}$$

proporţionale cu valorile tensiunilor principale. În expresia (4.109) s-a notat cu C factorul de scară, care se alege în funcţie de rezistenţa electrică

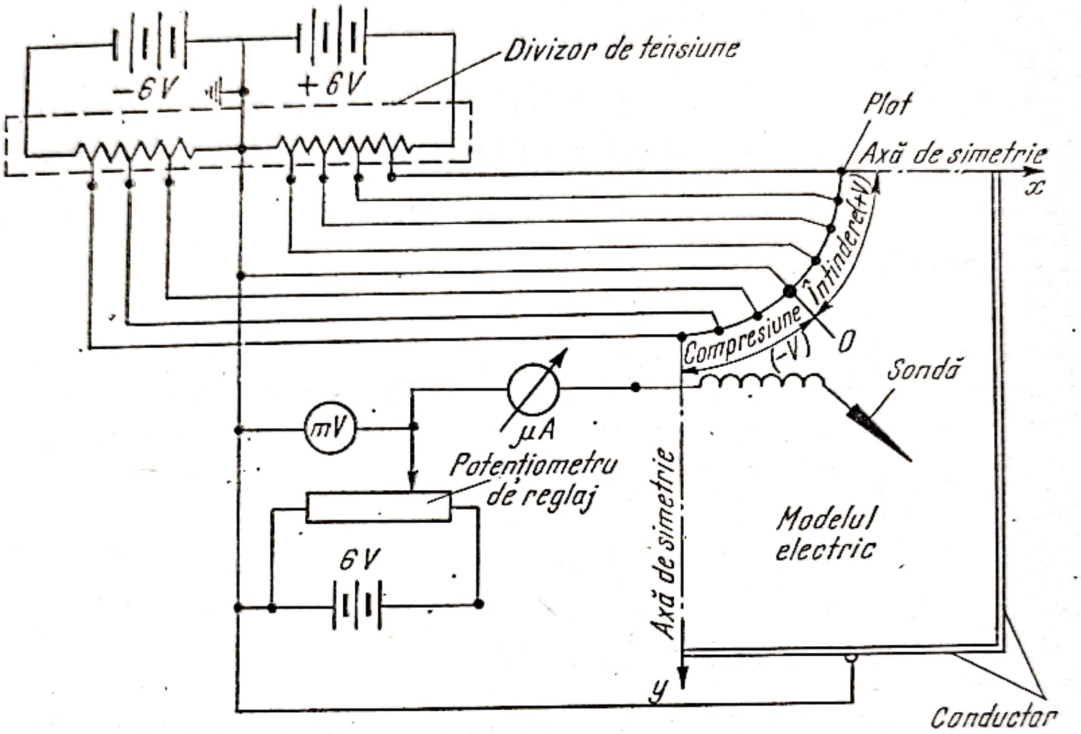


Fig. 4.52.

specifică a hîrtiei, iar cu σ_c valorile tensiunilor principale pe conturul modelului fotoelastic.

În aplicarea potenţialului pe contur trebuie să se ţină seama de semnul tensiunilor principale. Astfel pentru tensiunile de întindere se aplică potenţiale pozitive, iar pentru cele de compresiune potenţiale negative. Ordinul m al echipotenţialei (izopachei) care urmează să fie determinată se fixează cu ajutorul potenţiometrului de reglaj. Se recomandă să se determine echipotenţialele de ordinul 0, V_0, $2V_0$, $3V_0$, ..., care corespund izopachelor 0, σ_0, $2\sigma_0$, $3\sigma_0$, ... În acest caz potenţialul V_0 va trebui să fie

$$V_0 = C\sigma_0 \tag{4.110}$$

unde C este factorul de scară (vezi relaţia (4.109)), iar σ_0 este constanta fotoelastică a modelului.

Tensiunea corespunzătoare echipotenţialei care urmează să fie determinată fiind fixată prin potenţiometrul de reglaj, cu ajutorul sondei se caută punctele din model care au acelaşi potenţial cu cel fixat. Aceste

Scanned with OKEN Scanner

puncte se determină urmărind poziția acului microampermetrului. Astfel cînd sonda de control ajunge într-un punct situat pe echipotențiala căutată acul microampermetrului revine la zero, indicînd că prin sondă nu mai circulă nici un curent, punctul căutat avînd același potențial cu cel fixat pe potențiometrul de reglaj. Unind toate punctele care au același potențial se obține cîmpul izopachelor.

Avînd izopachele astfel determinate și pe de altă parte izocromatele obținute pe cale fotoelastică, se pot determina cu ușurință valorile tensiunilor principale.

Potențialul într-un punct i, situat pe echipotențiala de ordinul m, este

$$V_i = mV_0 = C\Phi_i. \tag{4.111}$$

Substituind (4.110) în (4.111) rezultă

$$\Phi_i = (\sigma_1 + \sigma_2)_i = m\sigma_0. \tag{4.112}$$

Din expresia (4.112) și (4.45)

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k\sigma_0$$

prin adunare și respectiv prin scădere se obțin valorile tensiunilor principale

$$\sigma_1 = \frac{m + k}{2}\,\sigma_0$$

$$\sigma_2 = \frac{m - k}{2}\,\sigma_0. \tag{4.113}$$

Precizia acestei metode, care s-a dovedit foarte practică, este determinată în mare parte de sensibilitatea microampermetrului. Pentru determinări foarte precise se recomandă înlocuirea microampermetrului cu un galvanometru de mare sensibilitate sau cu un osciloscop cu putere mare de amplificare.

4.6.6. ANALOGIA ELECTROOPTICĂ

Dacă în locul hîrtiei conductoare sau al apei din cuva electrolitică se folosesc soluții care într-un cîmp electric devin birefringente (prezintă efectul Kerr), suma tensiunilor principale poate fi vizualizată într-un polariscop circular așa cum se pun în evidență izocromatele în modelele fotoelastice. Există numeroase substanțe care prezintă această proprietate de a deveni birefringente într-un cîmp electric. Dintre acestea mai potrivită pentru analogia electrooptică este un colorant organic soluție de 1% în apă distilată, cunoscut sub denumirea comercială de Milling Yellow NGS.

Pentru determinarea izopachelor se confecționează o cuvă dintr-un material transparent (de exemplu stiplex) avînd conturul piesei de studiat și o adîncime de 25 — 30 mm. Se introduce în cuvă o soluție optic activă de tipul celei descrise mai sus, iar pe contur se aplică electrozi alimentați

Scanned with OKEN Scanner

cu tensiune de la reţea prin intermediul unui autotransformator. Punctele de pe contur în care se aplică electrozii, cît şi potenţialele cu care se alimentează sînt determinate de condiţiile de contur care caracterizează modul de solicitare a modelului. Potenţialele de alimentare trebuie să fie cît mai scăzute pentru a nu periclita securitatea celor care lucrează, însă nici prea mici fiindcă în acest caz franjele devin neclare.

Modelul astfel confecţionat se examinează într-un polariscop cu lumină monocromatică polarizată circular. În acest caz în model pot fi observate o serie de franje de extincţie care reprezintă locul geometric al punctelor în care gradientul funcţiei de potenţial este constant (grad $V = ct$). Relaţia dintre ordinul unei benzi de extincţie oarecare numită şi izocromată electrică şi gradientul tensiunii corespunzătoare nu este liniară. În afară de aceasta s-a constatat că efectul optic care se obţine este influenţat considerabil de temperatură. De aceea, pentru o interpretare cît mai exactă a determinărilor, este necesar ca mai întîi să se facă etalonarea soluţiei. Se pot folosi desigur diverse procedee de etalonare. O metodă foarte practică [36] este următoarea : se confecţionează o cuvă avînd forma unui sector circular şi grosimea egală cu cea a cuvei, model în care se plasează radial doi electrozi (fig. 4.53, a), în cuvă fiind aceeaşi soluţie ca şi în model. Dacă diferenţa de potenţial aplicată între cei doi electrozi este V, gradientul funcţiei de potenţial corespunzător unei franje de extincţie este constant şi se calculează împărţind acest potenţial la lungimea

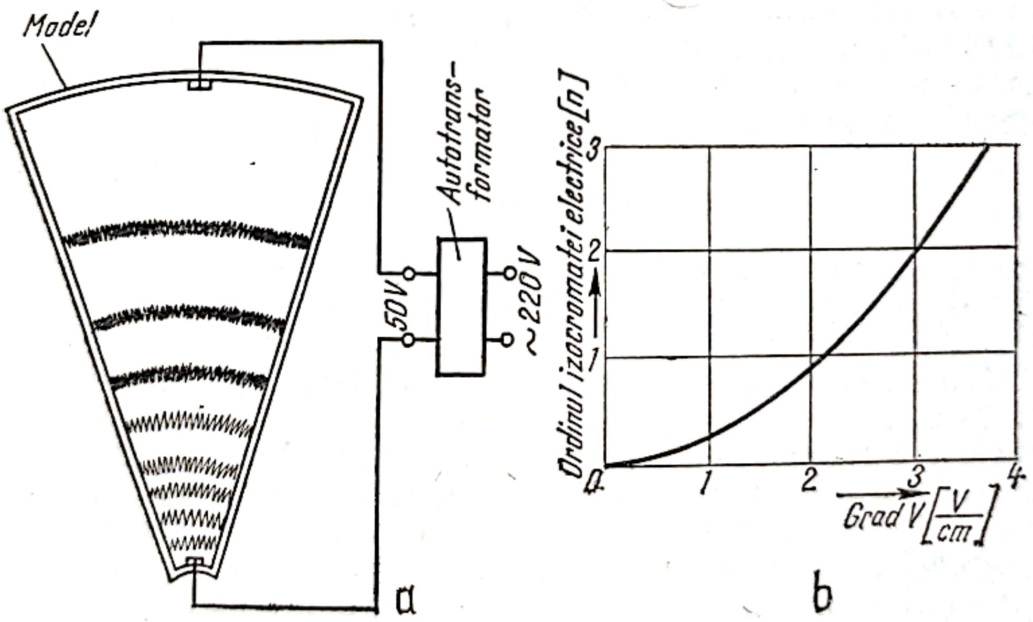


Fig. 4.53.

arcului de cerc de rază r corespunzător franjei respective. În felul acesta se poate trasa curba de etalonare, ordin de bandă (n), în funcţie de grad V, exprimat în V/cm, pentru o anumită temperatură. În fig. 4.53, b, se prezintă aliura curbei de etalonare corespunzătoare unei temperaturi constante.

Scanned with OKEN Scanner

După cum s-a putut constata la baza acestei metode stă de asemenea analogia dintre cîmpul de tensiune şi cîmpul de potenţial electric, care este vizualizat datorită fenomenului de birefringenţă pe care îl prezintă soluţia din interiorul modelului. Modelarea electrooptică este posibilă dacă se cunoaşte modul de variaţie al sumei tensiunilor principale. Astfel, la solicitarea axială unde suma tensiunilor principale este constantă, o franjă oarecare n în lungul căreia grad V = ct reprezintă şi locul geometric al punctelor în care funcţia de tensiune

$$\Phi = \sigma_1 + \sigma_2 = \text{ct.}$$

Prin urmare, se poate scrie

$$(\text{grad } V)_n = C\Phi_n \tag{4.114}$$

unde C este factorul de scară, care în acest caz, ca şi la analogia electrică, se stabileşte pornind de la faptul că pe un contur neîncărcat una din tensiunile principale (cea normală la contur), este nulă şi deci diferenţa tensiunilor principale este egală cu suma lor.

Din expresia (4.114) rezultă

$$\Phi_n = (\sigma_1 + \sigma_2)_n = \frac{1}{C}(\text{grad } V)_n. \tag{4.115}$$

Cunoscînd suma tensiunilor principale într-un punct, calculată cu (4.115) din determinările electrooptice, cît şi diferenţa lor obţinută cu (4.45) din determinările fotoelastice, se pot calcula valorile individuale ale tensiunilor principale în punctul considerat.

4.6.7. METODA MOIRÉ

Printre metodele folosite cu succes în analiza experimentală a stării de tensiune se numără şi metodele interferometrice prezentate în cap. 5.

Ca şi fotoelasticitatea, metodele interferometrice dau posibilitatea vizualizării întregului cîmp de tensiuni şi deformaţii prin franjele de interferenţă care se formează pe suprafaţa modelului. Utilizarea acestor metode permite o rezolvare completă a numeroase probleme de analiză experimentală a stării de tensiune şi deformaţie. În practica experimentală de multe ori, în anumite probleme, metodele interferometrice se folosesc şi ca metode auxiliare pentru completarea determinărilor fotoelastice cu datele necesare unei analize complete a cîmpului de tensiune (vezi paragraful 5.4).

Tehnica metodelor interferometrice cunoaşte o mare varietate de procedee de lucru, unele fiind dezvoltate şi perfecţionate în ultimii ani. Dintre aceste metode, interferometria mecanică cunoscută şi sub denumirea de metoda moiré, cunoaşte o largă utilizare practică. După cum se arată în capitolul 5, franjele care se formează prin efectul moiré în urma deplasării reţelei de pe model faţă de reţeaua martor, reprezintă locul geometric al punctelor care au aceeaşi componentă a deplasării faţă de reţeaua martor

Scanned with OKEN Scanner

nedeformată. Prin urmare, cîmpul de franje moiré constituie o suprafață deformată în spațiu, iar panta tangentei dusă într-un punct al suprafeței în direcție perpendiculară pe liniile rețelei de referință, reprezintă deformația specifică în punctul considerat pe aceeași direcție (fig. 4.54).

Dacă se utilizează două modele și pe fiecare din ele se aplică cîte o rețea (pe un model liniile rețelei fiind paralele cu axa x iar pe celălalt cu axa y),

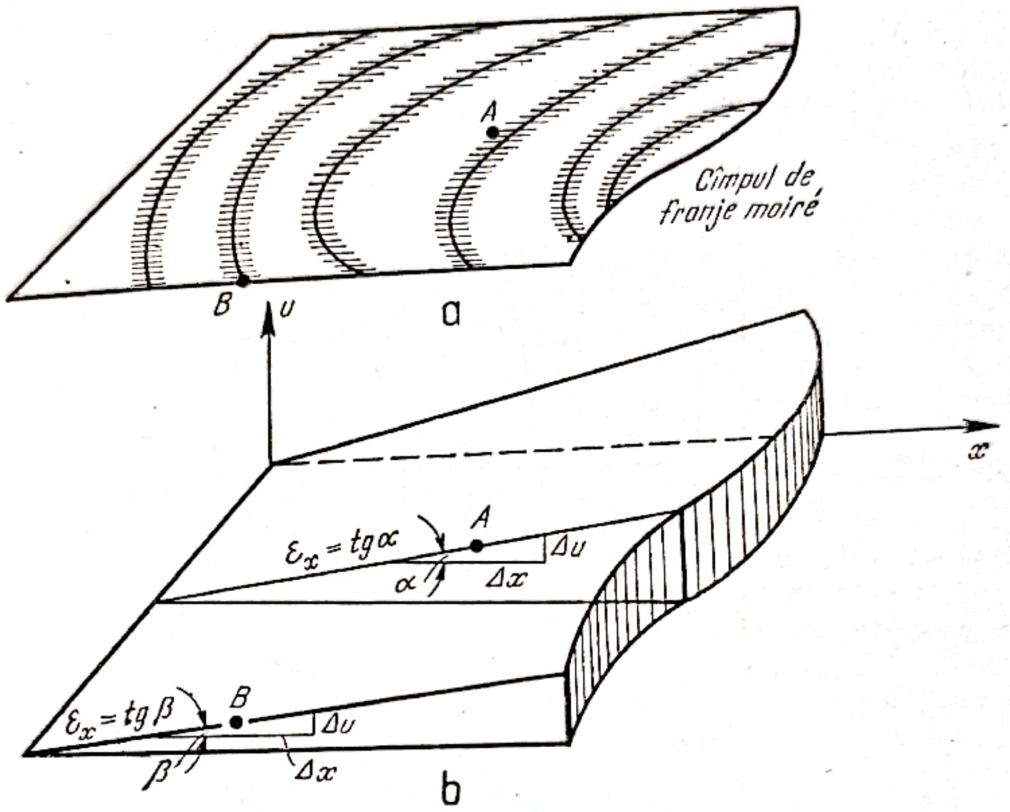


Fig. 4.54.

în urma deformării acestor rețele, față de rețelele martor corespondente, pot fi determinate deplasările u și v. Cu ajutorul deplasărilor u și v se calculează apoi cele trei componente ale deformației cu relațiile

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}\,; \qquad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}\,; \qquad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}. \tag{4.116}$$

În cele ce urmează interesează doar deformațiile specifice ε_x și ε_y; prin urmare, trebuiesc cunoscuți gradienții deplasărilor pe cele două direcții x și y. Gradienții deplasărilor într-un punct $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right.$ și $\left.\frac{\partial v}{\partial y}\right)$ se obțin calculînd pantele tangentelor duse în punctul respectiv de pe cele două suprafețe, în direcție perpendiculară pe liniile rețelelor de referință. În practică se obișnuiește să se traseze curbele de variație a celor două deplasări u și v pe direcții paralele cu Ox și Oy. În fig. 4.55, a și b se prezintă curba de variație a deplasării u în lungul axei Ox. În mod asemănător se

Scanned with OKEN Scanner

poate trasa şi curba de variaţie a deplasării v în lungul axei Oy, utilizînd cea de a doua reţea cu liniile paralele cu Ox.

Utilizînd cele două cîmpuri de franje, deplasările u şi v se calculează cu relaţiile

$$u = \frac{N_y}{p} \quad \text{şi} \quad v = \frac{N_x}{p} \tag{4.117}$$

unde N_x şi N_y sînt ordinele de bandă ale franjelor moiré obţinute într-un punct în cele două cîmpuri avînd liniile paralele cu Ox, respectiv cu Oy, iar p este pasul reţelelor, care este acelaşi în ambele cazuri. Pantele tan-

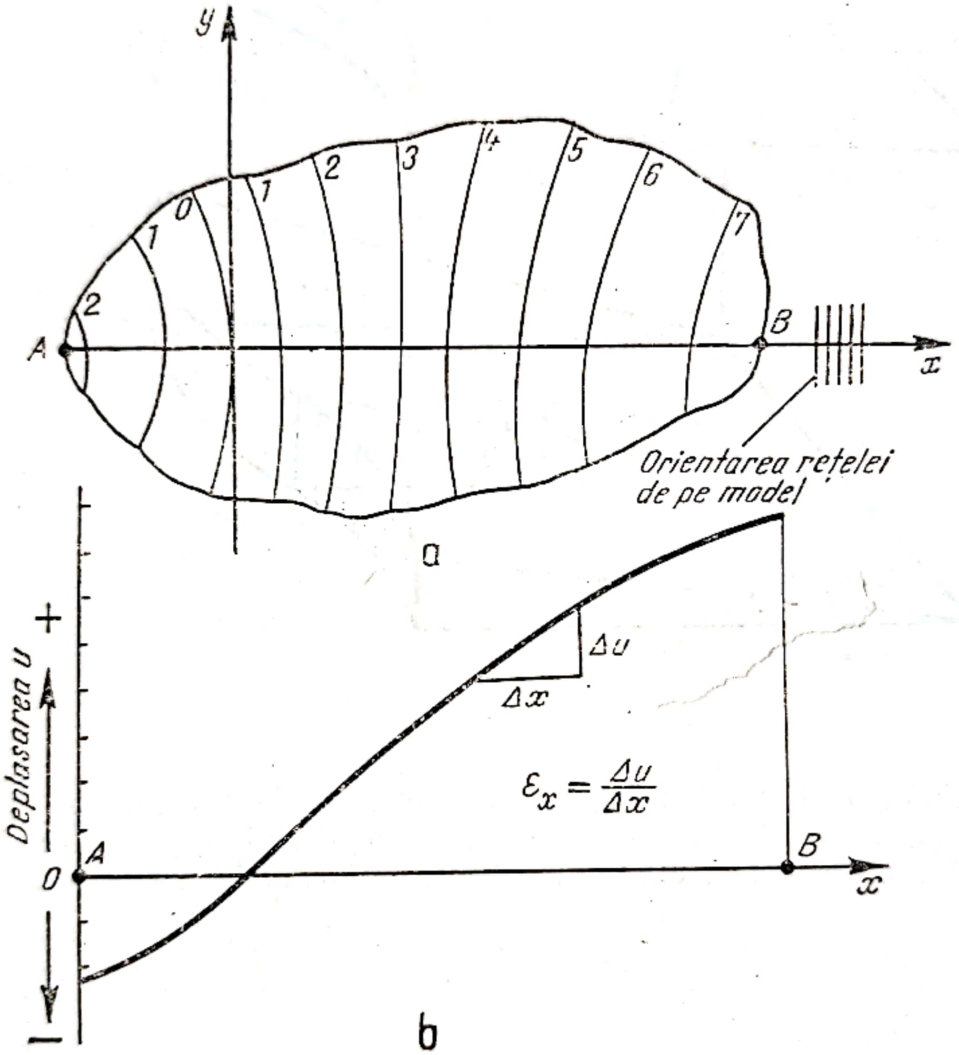


Fig. 4.55.

gentelor duse la cele două curbe vor da valorile deformaţiilor specifice ε_x şi ε_y în punctul considerat (vezi paragraful 5.2.5)

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \simeq \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \simeq \frac{\Delta v}{\Delta y}, \tag{4.118}$$

Scanned with OKEN Scanner

Extinzînd aceste determinări pentru o rețea de linii care acopere întreaga suprafață a modelului, se obțin datele necesare, care împreună cu cele rezultate din determinările fotoelastice, permit calculul valorilor tensiunilor principale cu ajutorul expresiilor (4.97).

4.6.8. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICĂ

Pe lîngă interferometria mecanică bazată pe fenomenul moiré, în analiza experimentală a stării de tensiune și deformație, metodele de interferometrie optică și-au găsit de asemenea un larg domeniu de aplicabilitate. Folosită la început ca mijloc foarte precis pentru determinarea deformației într-un punct cu ajutorul extensometrelor, interferometria optică a fost adaptată și dezvoltată și pentru obținerea cîmpului de izopache (vezi cap. 5.4). În literatura de specialitate se cunosc numeroase dispozitive optice [3], [10], [11], [37], [45], care bazate pe diferite moduri de producere a fenomenului de interferență a luminii, permit determinarea franjelor izopache. Cu toate acestea utilizarea acestor dispozitive este limitată datorită condițiilor deosebite impuse prelucrării modelelor (suprafețele modelelor trebuind să fie perfect plane și paralele). În afară de aceasta, cîmpul de franje obținut se referă la un domeniu foarte restrîns din suprafața modelului.

Odată cu punerea la punct a laserului ca sursă de lumină coerentă și monocromatică s-a dezvoltat holografia. După cum se arată în capitolul 5, holografia este o metodă optică de stocare și redare a unei mari cantități de informație privind proprietățile optice și natura tridimensională a corpurilor. Procedeul de stocare a informației primită sub formă de radiații luminoase, pe o hologramă, se bazează pe producerea fenomenului de interferență între două fascicule de lumină coerentă.

Ca și celelalte metode interferometrice, holografia poate fi utilizată ca metodă auxiliară fotoelasticității pentru determinarea tensiunilor σ_1 și σ_2. În fig. 4.56 se prezintă un montaj foarte simplu folosit pentru obținerea cîmpului de izopache. În acest caz modelul se confecționează dintr-un material transparent (plexiglas), cu proprietăți de birefringență reduse.

Modelul fiind neîncărcat, pe placa fotografică se înregistrează o primă hologramă, se încarcă și apoi se înregistrează a doua hologramă pe aceeași placă, suprapusă peste prima.

Prin încărcare, modelul se deformează, schimbîndu-și foarte puțin grosimea în diferite puncte, astfel că lungimea drumului optic în al doilea caz se modifică ușor față de primul. Aceasta face ca între cele două imagini înregistrate să apară o mică diferență. Din interferența celor două imagini, la reconstituire, pe imaginea modelului, se va forma cîmpul de franje izopache. În legătură cu procedeul prezentat, trebuie arătat că pe placa fotografică au fost înregistrate imaginile determinate numai de modificarea drumului optic între cele două expuneri și prin urmare în acest caz nu mai este necesară o prelucrare deosebită a modelului.

Scanned with OKEN Scanner

Izopachele înregistrate prin procedeul interferometriei holografice împreună cu izocromatele și izoclinele obținute pe cale fotoelastică, furnizează toate elementele necesare determinării stării de tensiune din model.

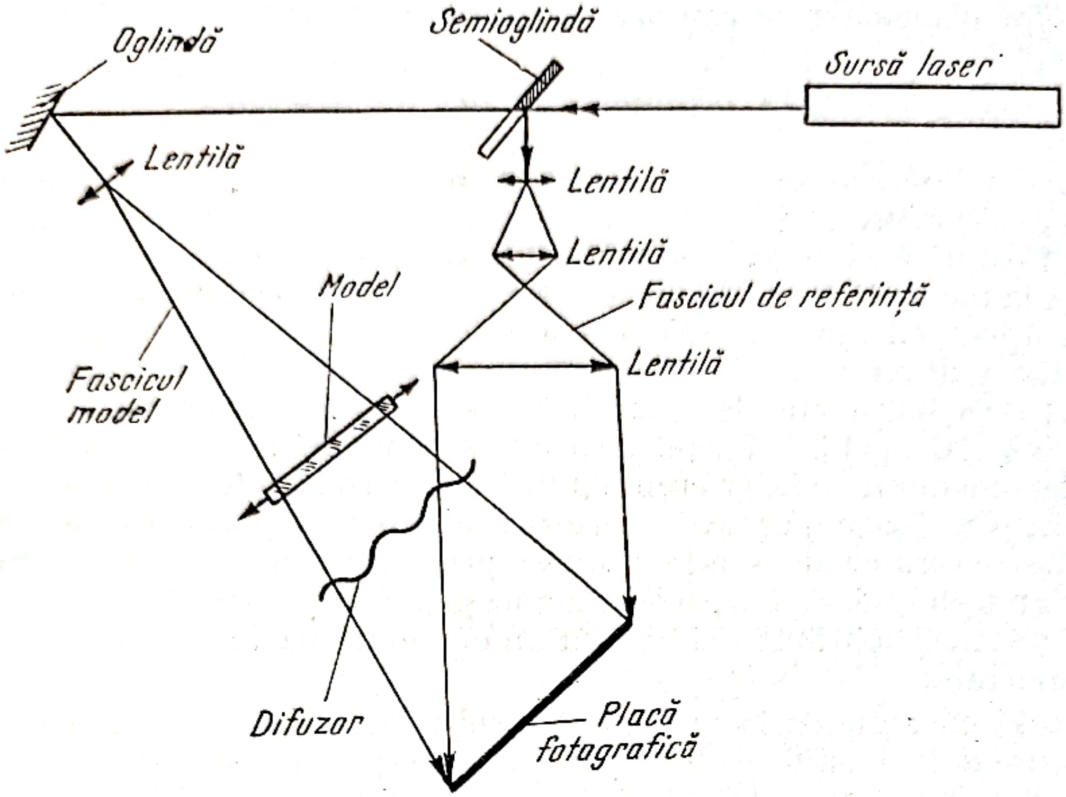


Fig. 4.56.

4.6.9. TENSOMETRIA CU TRADUCTOARE REZISTIVE

În acest caz în punctele de pe suprafața modelului în care urmează să se determine tensiunile principale σ_1 și σ_2 se aplică pe direcții paralele cu x și y, traductoare rezistive sau rozete cu traductoare. După încărcarea modelului, cu ajutorul unei punți tensometrice se determină deformațiile specifice ε_x și ε_y pe aceste direcții. Datele obținute astfel pe cale tensoelectrică, împreună cu cele rezultate din determinările fotoelastice servesc la calcularea valorilor individuale ale tensiunilor principale σ_1 și σ_2 cu ajutorul expresiei (4.97).

Metoda prezintă dezavantajul că furnizează date privind suma tensiunilor în anumite puncte. Pe de altă parte, pentru localizarea cît mai precisă a punctelor de măsură sînt necesare traductoare cu baza de măsură cît mai mică. Din aceste motive metoda se folosește numai în cazurile în care se cercetează anumite puncte din model în care gradientul tensiunilor este mic.

4.7. TRECEREA REZULTATELOR DE LA MODEL LA PIESA REALĂ

După cum s-a putut vedea, pentru investigarea stării de tensiune dintr-un corp, tehnica fotoelasticității recurge la un model al corpului, executat la scară, dintr-un material cu anumite proprietăți optice.

Scanned with OKEN Scanner

Fiind determinată starea de tensiune pe modelul fotoelastic, se pune problema modului în care trebuiesc transferate aceste determinări pe piesa reală, astfel ca rezultatele obținute să corespundă realității. Modelele fotoelastice se confecționează în mod curent din rășini epoxidice ale căror constante elastice diferă foarte mult de cele ale materialului din care sînt executate piesele reale.

Prin urmare, este de așteptat ca trecerea rezultatelor de pe model pe prototip să fie condiționată de anumiți factori. De aceea este necesar să se stabilească acești factori și măsura în care influențează asupra stării reale de tensiune din corp. Răspunsul la această problemă se obține examinînd ecuația de compatibilitate scrisă pentru starea plană de tensiune

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) = -(\mu + 1)\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y}\right) \qquad (4.119)$$

unde σ_x și σ_y sînt tensiunile pe două direcții într-un punct din plan, μ este constanta lui Poisson, iar F_x și F_y componentele forțelor masice pe direcțiile x și y în punctul considerat.

Din examinarea expresiei (4.119) rezultă că distribuția tensiunilor obținută prin aplicarea tehnicii fotoelasticității la o problemă plană, nu depinde de modulul de elasticitate E al materialului fotoelastic. Ca urmare, rezultatele obținute pe modelul fotoelastic pot fi transferate fără nici un fel de restricție prototipului, cu condiția ca și acesta să fie alcătuit dintr-un material omogen și izotrop.

Din expresia (4.119) rezultă că distribuția tensiunilor din model este determinată totuși de distribuția forțelor masice și de constanta elastică a lui Poisson.

Dacă

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = 0 \qquad (4.120)$$

distribuția tensiunilor din model este independentă de constanta lui Poisson. Această condiție este satisfăcută în următoarele situații

$F_x = F_y = 0$ (în absența forțelor masice).

$F_x = C_1; F_y = C_2$ (în cazul în care cîmpul forțelor masice este uniform, exemplul cîmpul gravitațional).

$F_x = C_1 x; F_y = -C_1 y$ (în cazul unui cîmp al forțelor masice cu o distribuție liniară în x și y).

Cum în majoritatea problemelor care se studiază prin fotoelasticitate cîmpul forțelor masice este constant (find cîmpul gravitațional), rezultă că distribuția tensiunilor în acest caz este independentă de constanta lui Poisson. Trebuie arătat însă că există două cazuri particulare în care criteriile de similitudine stabilite mai sus nu se verifică. Astfel dacă modelul fotoelastic bidimensional este multiplu conex (cu găuri în interior) coeficientul lui Poisson influențează asupra distribuției tensiunilor prin natura forțelor aplicate pe contururile interioare. Dacă rezultanta forțelor care acțio-

Scanned with OKEN Scanner

nează pe fiecare contur interior este nulă, distribuția tensiunilor va fi independentă de constanta lui Poisson. Într-o serie de cercetări experimentale întreprinse pe modele cu contururi dublu conexe, avînd forțe neechilibrate pe contururile interioare, s-a putut evalua efectul coeficientului Poisson asupra distribuției tensiunilor. Astfel s-a constatat că influența coeficientului lui Poisson asupra tensiunilor principale este de regulă sub 7 %. În literatura de specialitate se întîlnesc o serie de lucrări [7] în care se prezintă metode pentru corectarea influenței coeficientului Poisson la modelele dublu conexe cu sarcini neechilibrate pe contururile interioare. În majoritatea cazurilor practice această corecție se neglijează.

Un al doilea caz particular în care criteriile de similitudine nu sînt satisfăcute, se întîlnește la unele materiale fotoelastice care prezintă distorsiuni locale apreciabile în zonele de aplicarea sarcinilor. Aceste distorsiuni reprezintă o sursă importantă de erori în evaluarea tensiunilor, mai ales în cazul unor concentratori. În general acest efect poate fi minimalizat prin alegerea unui material fotoelastic cu sensibilitate optică scăzută sau prin reducerea încărcării la o valoare minimă pentru care răspunsul modelului să fie suficient de clar.

În majoritatea cazurilor, modelele fotoelastice diferă foarte mult față de prototip prin dimensiuni, constante elastice cît și prin mărimea sarcinilor cu care sînt încărcate. De aceea pentru evaluarea stării de tensiune din piesa reală trebuie să se introducă în calcul factorii de scară. Astfel în cazul unui model bidimensional încărcat cu sarcina concentrată P, factorii de scară, care intervin în calculul tensiunilor se stabilesc pornind de la expresiile tensiunilor scrise pentru prototip și model

$$\sigma_p = \frac{P_p}{b_p h_p} \quad \text{și} \quad \sigma_m = \frac{P_m}{b_m h_m}. \tag{4.121}$$

Împărțind cele două relații (4.121) se obține

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{P_p}{P_m} \frac{b_m}{b_p} \frac{h_m}{h_p}. \tag{4.122}$$

Notînd cu α și β factorii de scară pentru lățimi respectiv pentru grosimi din relația (4.122) se obține

$$\sigma_p = \sigma_m \frac{P_p}{P_m} \alpha \cdot \beta. \tag{4.123}$$

În mod obișnuit pentru lungimi se adoptă aceeași scară și atunci rezultă

$$\alpha = \beta = \frac{l_m}{l_p} = \lambda \tag{4.124}$$

Prin urmare,

$$\sigma_p = \lambda^2 \frac{P_p}{P_m} \sigma_m. \tag{4.125}$$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.3.

Relații de trecere pentru calculul tensiunilor, deformațiilor și deplasărilor în cazul structurilor liniare

Nr. crt.	Modul de încărcare	Relații pentru calculul tensiunilor pe prototip	Relații pentru calculul deformațiilor specifice pe prototip	Relații pentru calculul deplasărilor pe prototip
1	Sarcinini concentrate P (daN)	$\sigma_p = \lambda^2 \frac{P_p}{P_m} \cdot \sigma_m$	$\varepsilon_p = \lambda^2 \frac{P_p}{P_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \varepsilon_m$	$u_p = \lambda \frac{P_p}{P_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot u_m$
2	Sarcini distribuite pe unitatea de lungime p(daN/m)	$\sigma_p = \lambda \frac{p_p}{p_m} \cdot \sigma_m$	$\varepsilon_p = \lambda \frac{p_p}{p_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \varepsilon_m$	$u_p = \frac{p_p}{p_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot u_m$
3	Sarcini distribuite pe unitatea de suprafață q (daN/m²)	$\sigma_p = \frac{q_p}{q_m} \cdot \sigma_m$	$\varepsilon_p = \frac{q_p}{q_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \varepsilon_m$	$u_p = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{q_p}{q_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot u_m$
4	Sarcini distribuite pe unitatea de volum f (daN/m³)	$\sigma_p = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{f_p}{f_m} \cdot \sigma_m$	$\varepsilon_p = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{f_p}{f_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \varepsilon_m$	$u_p = \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{f_p}{f_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot u_m$
5	Momente M (daN · m)	$\sigma_p = \lambda^3 \frac{M_p}{M_m} \cdot \sigma_m$	$\varepsilon_p = \lambda^3 \frac{M_p}{M_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \varepsilon_m$	$u_p = \lambda^2 \frac{M_p}{M_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot u_m$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru determinarea deformaţiilor specifice pe prototip se procedează asemănător, obţinîndu-se următoarea expresie de calcul

$$\varepsilon_p = \lambda^2 \frac{P_p}{P_m} \frac{E_m}{E_p} \varepsilon_m. \tag{4.126}$$

unde cu ε şi E au fost notate deformaţiile specifice respectiv modulele de elasticitate longitudinale. Indicii p şi m se referă şi în acest caz la prototip şi model.

Expresiile pentru calculul tensiunilor deformaţiilor şi deplasărilor pe prototip, pentru diferite moduri de încărcare, deduse asemănător au fost trecute în tabelul 4.3.

În concluzie se poate spune că starea de tensiune determinată experimental pe modelul fotoelastic corespunde stării de tensiune din prototip în majoritatea problemelor bidimensionale. Coeficientul lui Poisson nu influenţează distribuţia tensiunilor în cazul domeniilor simplu conexe şi în absenţa forţelor masice. În cazul domeniilor multiplu conexe influenţa coeficientului Poisson asupra valorilor tensiunilor principale este mică şi practic poate fi neglijată. În evaluarea mărimii tensiunilor şi deformaţiilor trebuie să se ţină seama de scara forţelor şi a lungimilor.

4.8. APLICAŢII ALE FOTOELASTICITĂŢII PENTRU SOLUŢIONAREA UNOR PROBLEME PLANE

Se prezintă pe scurt cîteva probleme plane soluţionate prin folosirea tehnicii fotoelasticităţii. Exemplele alese sînt în general simple, mai mult cu caracter teoretic, urmărind să înfăţişeze cititorului modul de abordare şi rezolvare a unor probleme inginereşti. Alături de fotoelasticitate, în aceste exemple, pentru determinarea valorilor individuale ale tensiunilor principale sînt folosite şi alte metode auxiliare, descrise în paragraful 4.6.

4.8.1. STUDIUL VARIAŢIEI TENSIUNILOR ÎN PLATBANDE CU LĂŢIME VARIABILĂ ŞI RACORDĂRI CIRCULARE [38].

Pentru determinarea coeficientului de concentrare a tensiunilor în piesele cu concentratori este necesar să se cunoască modul de variaţie a tensiunilor principale în aceste zone. Sînt anumite tipuri de concentratori la care variaţia tensiunilor principale se poate dtermina prin calcul, pe cale analitică. La piesele cu forme mai complicate, metodele analitice de calcul nu mai pot fi folosite şi în această situaţie se folosesc metodele experimentale. În acest scop fotoelasticitatea s-a dovedit deosebit de utilă şi eficace.

În cele ce urmează se determină variaţia tensiunilor principale în platbande cu lăţime variabilă prevăzute cu diferite racordări circulare, solicitate la încovoiere, utilizînd tehnica fotoelasticităţii. Determinările fotoelastice au fost făcute pe două modele confecţionate din araldit avînd

Scanned with OKEN Scanner

forma şi dimensiunile din fig. 4.57. Racordările în zonele de trecere au fost făcute cu razele de 2,5 mm şi 1 mm. Fiecare model a fost solicitat la încovoiere cu un moment $M = 83$ daN.cm. Izocromatele înregistrate într-un polariscop cu lumină galbenă polarizată circular, pentru cele două

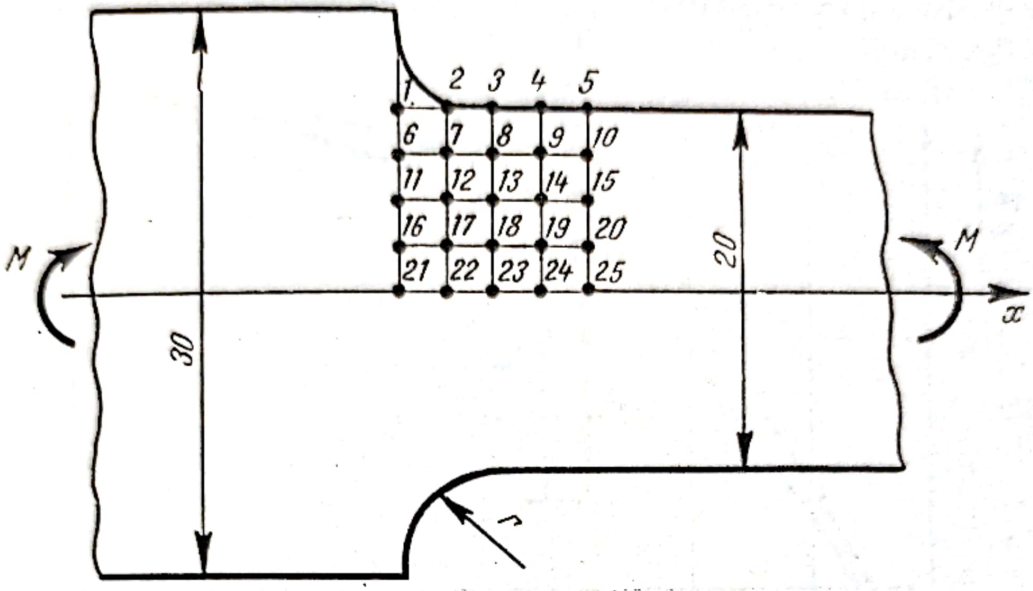


Fig. 4.57.

modele fotoelastice sînt prezentate în fig. 4.58, a şi b. Constanta fotoelastică a modelului determinată printr-o operaţiune de etalonare este $\sigma_0 = 21{,}6$ daN/cm² franje. Din determinările fotoelastice au rezultat diferenţele tensiunilor principale $\sigma_1 - \sigma_2$, în diferite puncte ale modelelor. Pentru separarea valorilor tensiunilor principale este necesar să se cunoască şi suma acestor tensiuni. Funcţia $\Phi = \sigma_1 + \sigma_2$ a fost determinată în acest caz pe cale numerică folosind reţeaua din fig. 4.57. Avînd în vedere că pe un contur neîncărcat tensiunea principală normală la contur este nulă, din determinările fotoelastice se obţin valorile tensiunii paralelă cu axa x, în nodurile *2, 3, 4, 5*, de pe contur. Tensiunile în nodurile *21*, *22*, *23*, *24* şi *25* vor fi nule deoarece aceste noduri sînt situate pe axa neutră a modelului. Valorile funcţiei $\Phi = \sigma_1 + \sigma_2$ în punctele *6*, *11*, *16*, *10*, *15* şi *20* situate pe conturul reţelei au fost determinate cu o metodă aproximativă cunoscută sub denumirea de metoda rozetei. Scriind apoi ecuaţia (4.104) pentru fiecare nod din interiorul reţelei, se obţine un sistem de nouă ecuaţii lineare cu nouă necunoscute, din rezolvarea căruia rezultă valorile funcţiei Φ în aceste noduri.

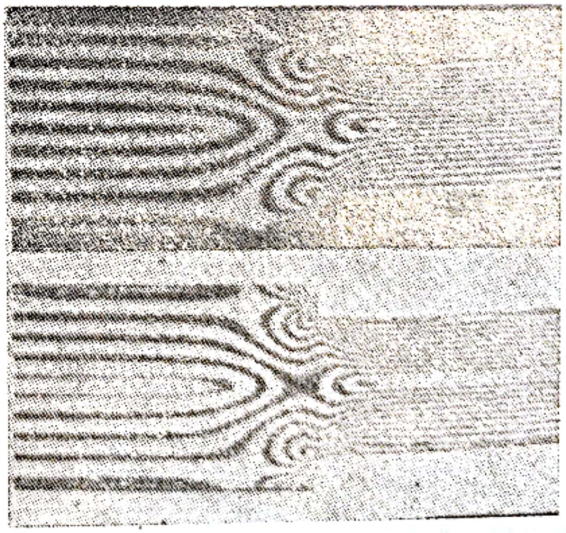


Fig. 4.58.

Scanned with OKEN Scanner

Cunoscînd astfel suma tensiunilor principale în nodurile reţelei pe de o parte şi diferenţa acestor tensiuni, din determinările fotoelastice, pe de altă parte, au fost calculate valorile individuale σ_1 şi σ_2 ale tensiunilor principale în nodurile reţelei. Curbele de variaţie a tensiunii principale maxime în zona de racordare pentru cele două cazuri examinate sînt trasate în fig. 4.59.

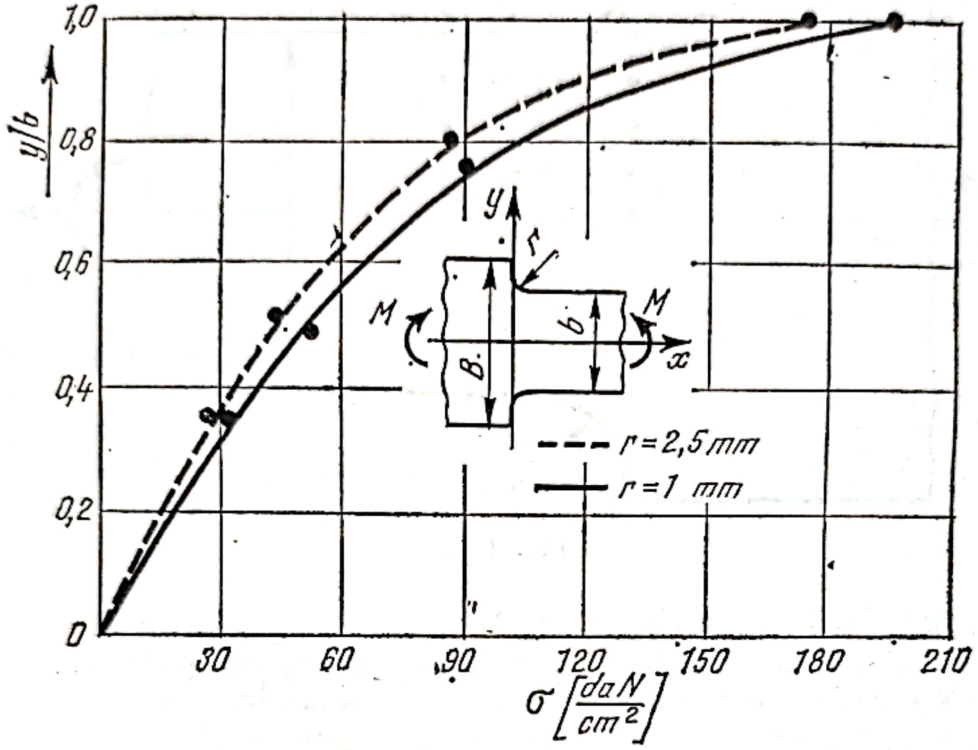


Fig. 4.59.

4.8.2. STUDIUL TENSIUNILOR ÎN PLATBANDE CU CRESTĂTURI SOLICITATE LA ÎNTINDERE ŞI ÎNCOVOIERE [39]

În cele ce urmează se prezintă un studiu al variaţiei tensiunilor în secţiunea minimă a două platbande cu crestături, solicitate la întindere şi respectiv la încovoiere. În acest caz pentru separarea tensiunilor principale s-a folosit analogia electrooptică.

Modelele fotoelastice ale celor două platbande avînd forma şi dimensiunile din fig. 4.60, au fost confecţionate din araldit cu grosimea de 5,83 mm. Materialul fotoelastic a fost etalonat pe o epruvetă solicitată la încovoiere. rezultînd constanta fotoelastică a modelului $\sigma_0 = 26{,}6$ daN/cm² franje.

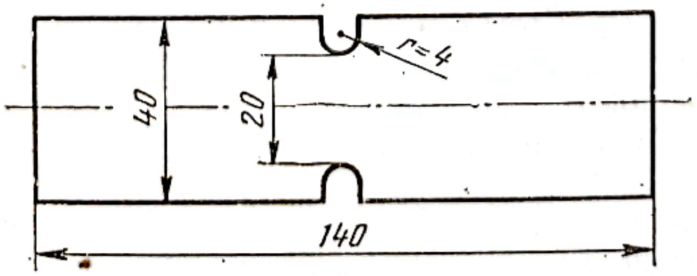
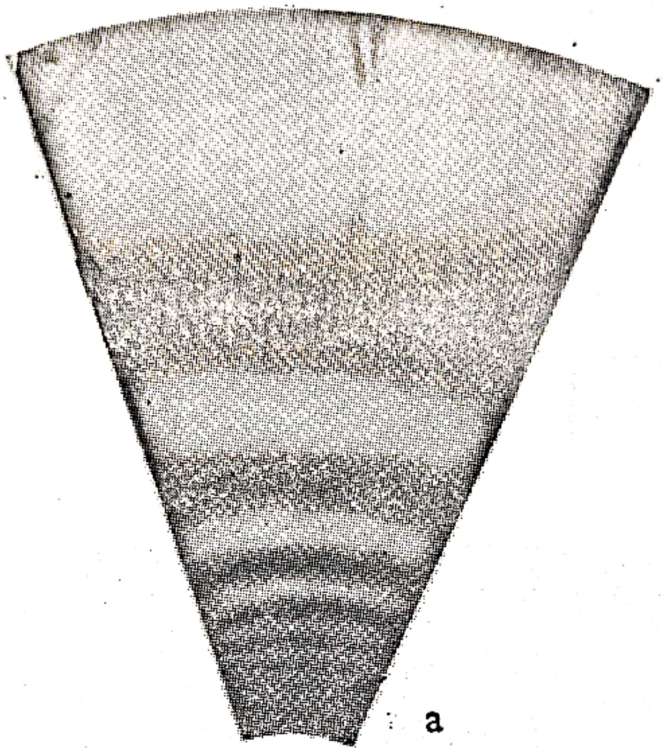


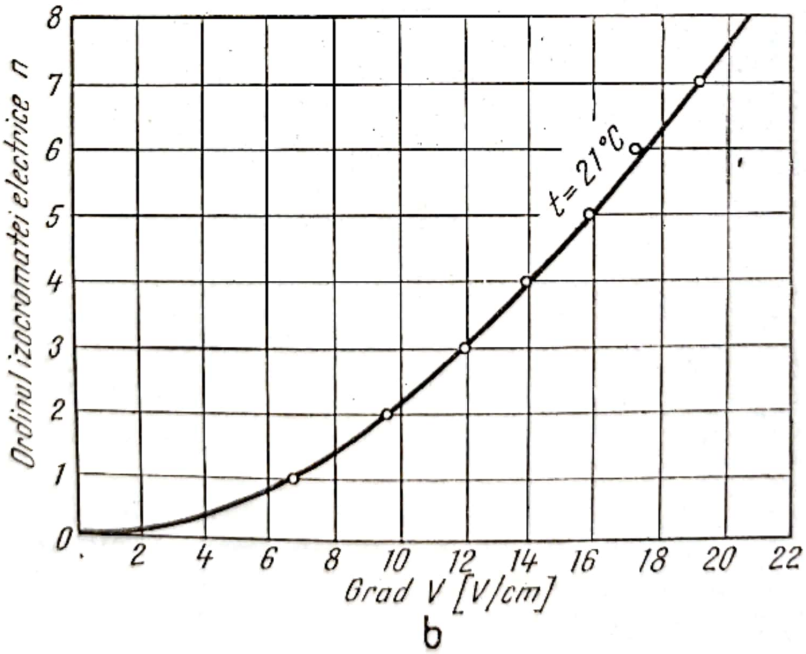
Fig. 4.60.

Scanned with OKEN Scanner

Modelul pentru analogia electro-optică a fost o cuvă din stiplex avînd în plan forma cu dimensiunile din fig. 4.60 și adîncimea de 25 mm. Ca electrolit s-a folosit o soluție de Milling Yellow NGS, cu apă distilată în concentrație de 1,5%. Electrozii au fost plasați în secțiunile de capete și alimentați cu tensiunea alternativă de 75 V. Pentru etalonarea modelului electro-optic s-a folosit o cuvă avînd forma unui sector de cerc cu adîncimea



a



b

Fig. 4.61.

de 25 mm. Liniile de extincție înregistrate la etalonare sînt prezentate în fig. 4.61, a. Diferența de potențial aplicată între cei doi electrozi a fost de 75 V. Gradientul tensiunii pe un arc de cerc cu rază r este constant și

Scanned with OKEN Scanner

se calculează împărțind valoarea potențialului aplicat la lungimea arcului. În felul acesta s-a trasat curba de etalonare prezentată în fig. 4.61, b, în coordonatele n și grad V pentru temperatura $t = 21°C$.

În cazul solicitării la întindere, modelul fotoelastic a fost încărcat cu o forță $P = 117$ daN. Izocromatele înregistrate în acest caz într-un polariscop cu lumină monocromatică polarizată circular, sînt prezentate în fig. 4.62. Ordinul de bandă maxim, citit la baza crestăturii a fost $k = 7,6$.

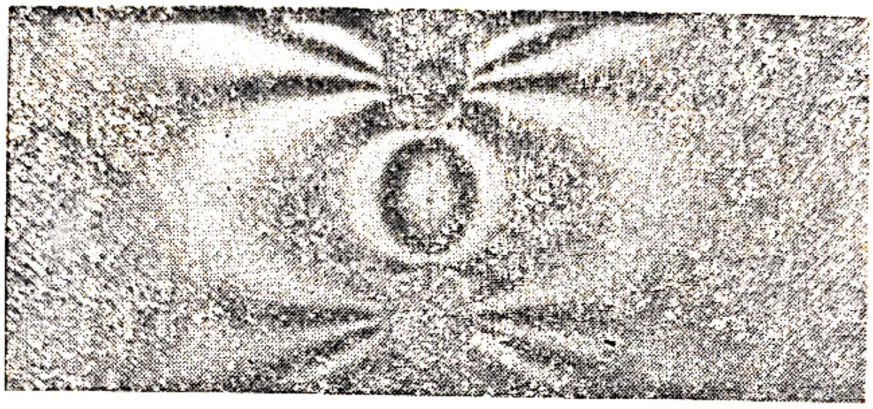


Fig. 4.62.

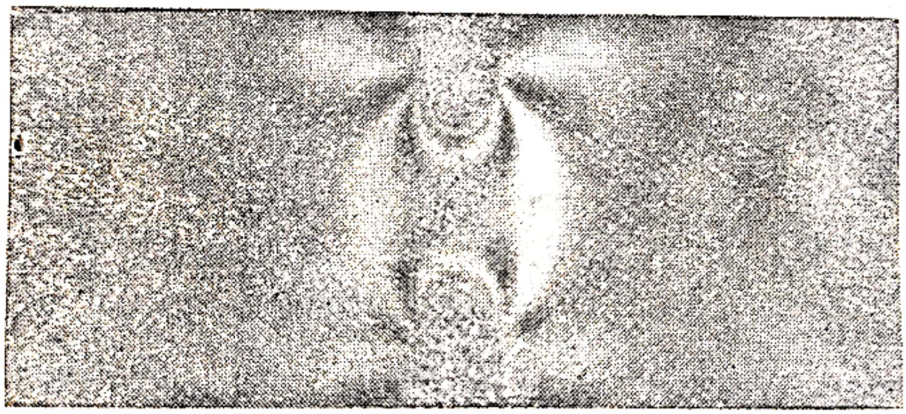


Fig. 4.63.

Izopachele înregistrate pe modelul electrooptic sînt prezentate în fig. 4.63 și au ordinul de bandă maxim $n = 5$.

Pe baza acestor determinări, în fig. 4.64 s-au trasat curbele de variație $\sigma_1 - \sigma_2$ și $\sigma_1 + \sigma_2$ în secțiunea minimă a platbandei cu ajutorul cărora s-au determinat apoi curbele de variație ale tensiunilor principale σ_1 și σ_2 (fig. 4.64).

Cel de-al doilea model fotoelastic avînd forma și dimensiunile din fig. 4.60 a fost solicitat la încovoiere pură printr-un moment de 51,1 daN.cm. Izocromatele înregistrate pe acest model sînt prezentate în fig. 4.65. Ordinul maxim de bandă la baza crestăturii a fost în acest caz, $k = 8,3$.

Izopachele prezentate în fig. 4.63 pot fi folosite și pentru studiul tensiunilor în platbanda solicitată la încovoiere pură. În acest caz, după cum este cunoscut, gradientul tensiunilor variază liniar. Această variație se obține prin integrarea funcției $\Phi = \sigma_1 + \sigma_2 = ct$

Scanned with OKEN Scanner

Curba de variație a funcției grad V în secțiunea cu concentrator, obținută cu ajutorul curbelor de extincție din fig. 4.63, este prezentată în partea inferioară a fig. 4.66.

Ținînd seama că la baza crestăturii $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_1 + \sigma_2$ și că în axa neutră $\sigma_1 + \sigma_2 = 0$, a fost trasată curba de variație $\sigma_1 + \sigma_2$ în secțiunea slăbită (fig. 4.66). Trasînd și curba de variație $\sigma_1 - \sigma_2$ în aceeași secțiune (fig. 4.66) cu ajutorul izocromatelor din fig. 4.65, au fost obținute curbele de variație ale tensiunilor σ_1 și σ_2.

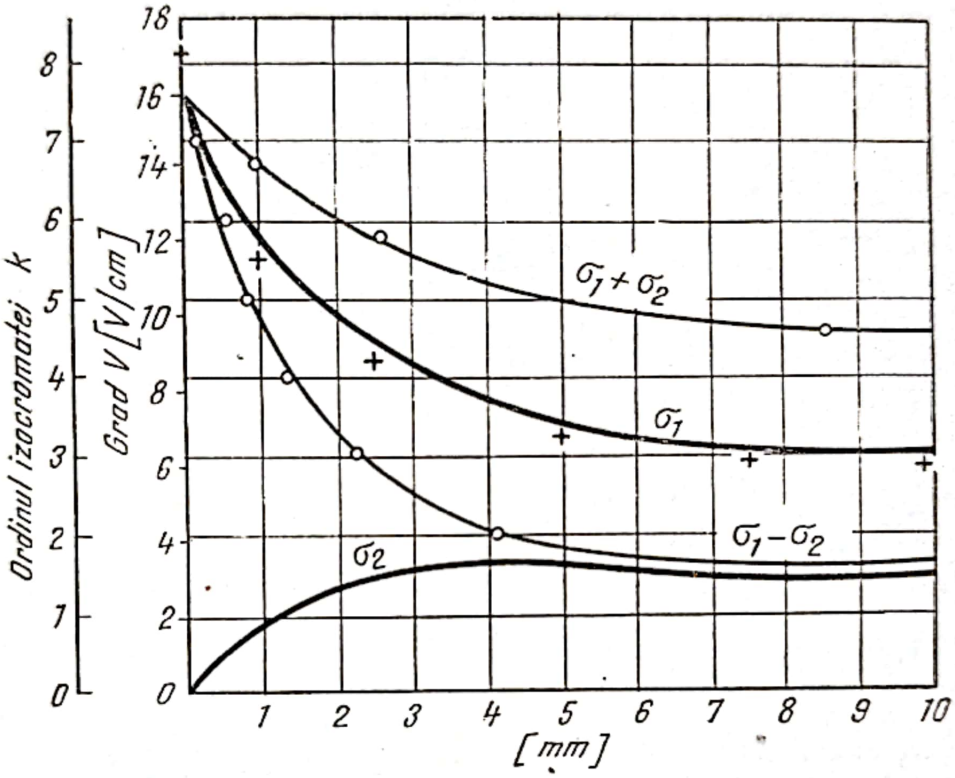


Fig. 4.64.

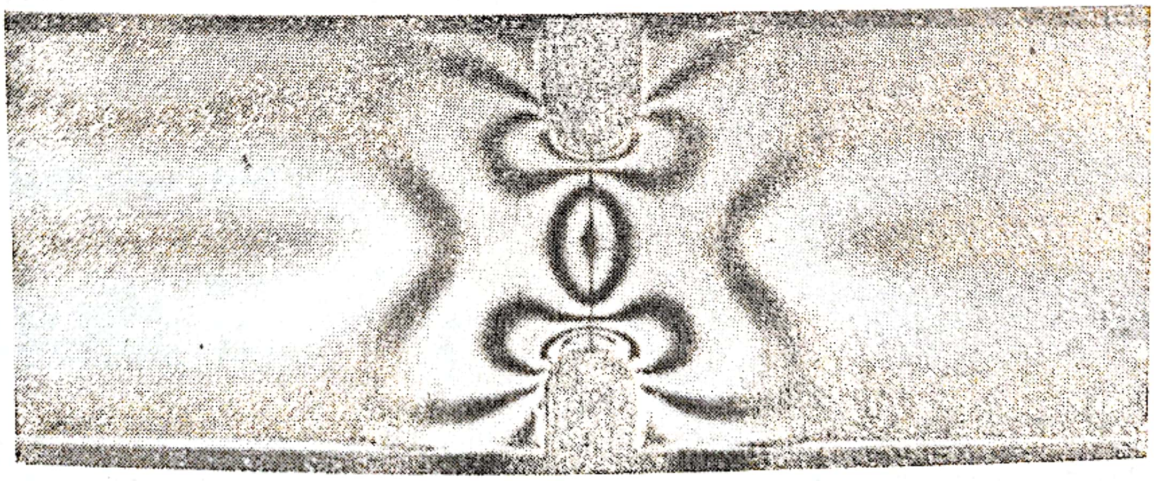


Fig. 4.65.

Scanned with OKEN Scanner

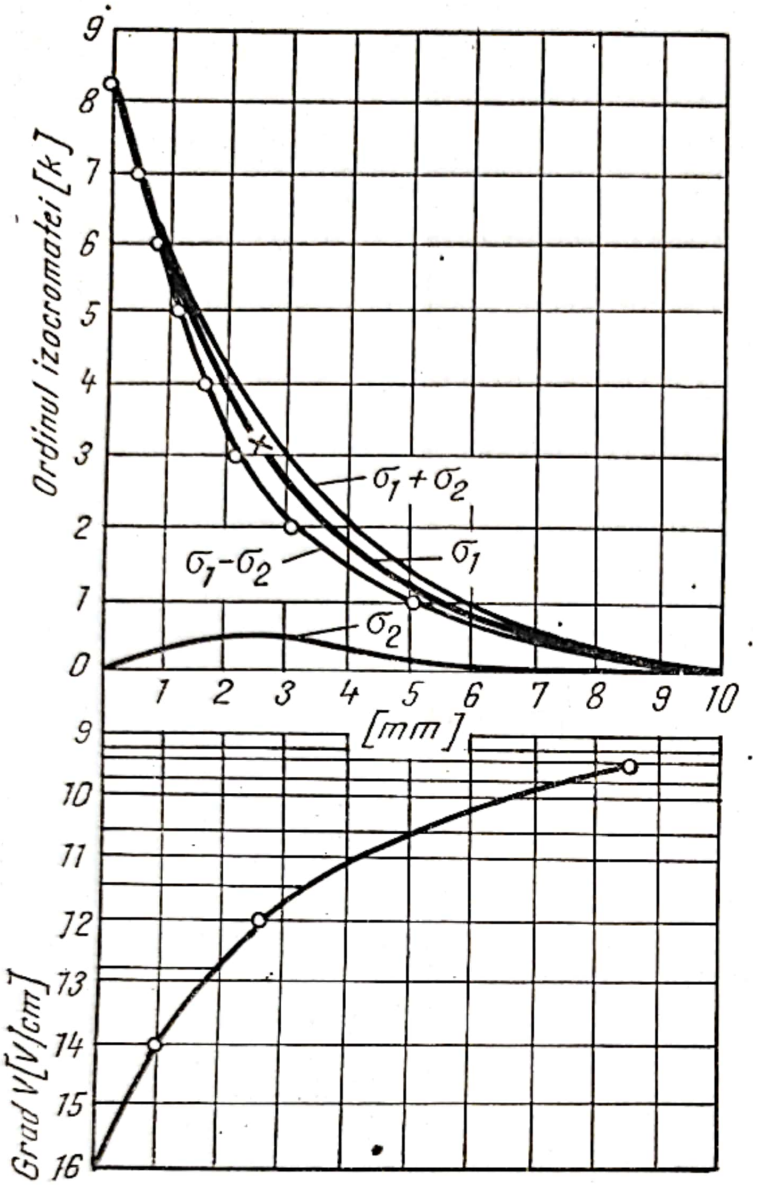


Fig. 4.66.

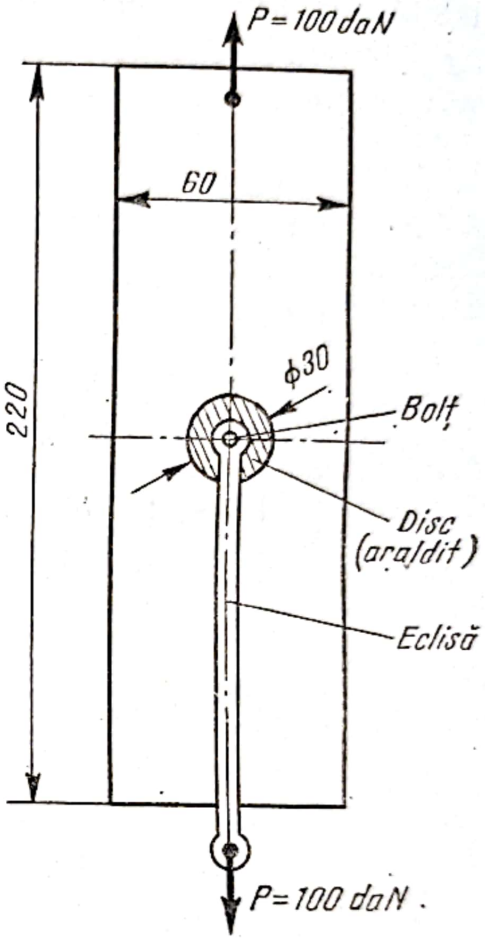


Fig. 4.67.

4.8.3. DISTRIBUȚIA TENSIUNILOR ÎNTR-O PLATBANDĂ GĂURITĂ SOLICITATĂ LA ÎNTINDERE PRIN INTERMEDIUL UNUI BOLȚ [22]

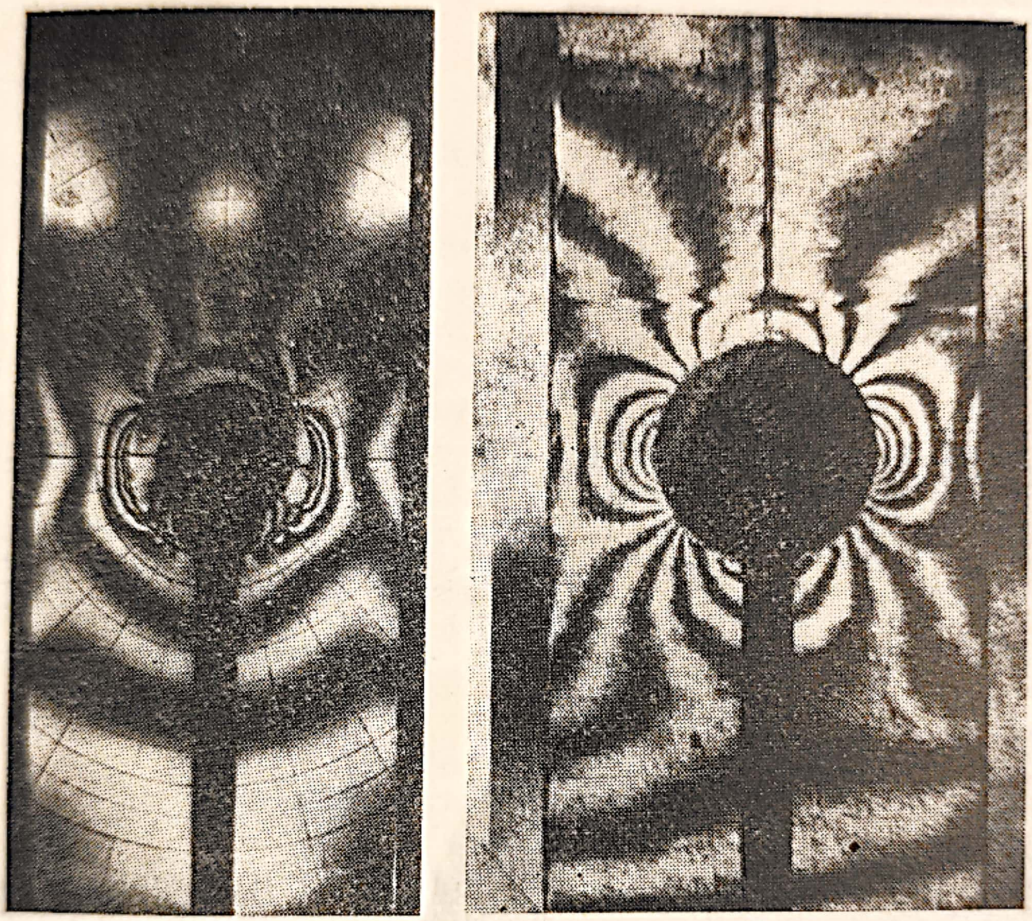
Se studiază distribuția tensiunilor în lungul axei orizontale de simetrie la o platbandă găurită solicitată la întindere de o forță aplicată prin intermediul unui bolț. Valorile individuale ale tensiunilor principale σ_1 și σ_2 au fost determinate folosind tehnica fotoelasticității combinată cu interferometria holografică.

Modelul fotoelastic al platbandei găurite (fig. 4.67) a fost confecționat dintr-o placă de araldit D, cu dimensiunile 220 × 60 × 5,4 mm³, prevăzută în partea centrală cu o gaură cu diametrul $D = 30$ mm. Constanta fotoelastică a modelului a fost determinată prin etalonare la încovoiere pură și are valoarea $\sigma_0 = 20$ daN/cm²·franje Modelul fotoelastic fixat la partea superioară pe cadrul dispozitivului de încărcare, a fost solicitat la întindere de o forță $P = 100$ daN. Pentru evitarea efectelor locale încărcarea s-a

Scanned with OKEN Scanner

făcut prin intermediul unui disc (fig. 4.67) confecționat tot din araldit și bine păsuit în gaura modelului. În fig. 4.68, a, se prezintă izocromatele înregistate în cîmp întunecat, într-un polariscop cu lumină monocromatică polarizată circular.

Izopachele au fost obținute prin interferometrie holografică utilizînd procedeul prin transparență cu dublă expunere prezentat în paragraful 4.6.8. Modelul în acest caz s-a confecționat din plexiglas avînd aceleași



a b

Fig. 4.68.

dimensiuni cu cel fotoelastic. Pentru înregistrarea hologramei s-a folosit un montaj asemănător celui din fig. 4.56 în care sursa de lumină a fost un laser cu He-Ne cu lungimea de undă a luminii $\lambda = 632{,}8 \times 10^{-9}$ m.

Hologrma a fost înregistrată pe o placă fotografică 9 × 12 AGFA-GEVAERT 8E-75. Modelul fiind neîncărcat, placa fotografică a fost expusă (la ambele fascicule) pentru 10 s. S-a încărcat apoi modelul cu o forță $P = 10$ daN și s-a expus din nou placa timp de 10 s.

Pentru reconstituire, în vederea fotografierii hologramei, s-a folosit numai fasciculul paralel (de referință), celălalt suprimîndu-se. În felul acesta s-a obținut imaginea virtuală a modelului în adevărată mărime, cu cîmpul de izopache. Izopachele înregistrate pe un film KB-14 (EFKE 135 — 36) sînt prezentate în fig. 4.68, b.

Scanned with OKEN Scanner

Prin prelucrarea datelor furnizate de cele două familii de franje din fig. 4.68, s-au trasat curbele $\sigma_1 - \sigma_2$ și $\sigma_1 + \sigma_2$ din fig. 4.69, cu ajutorul cărora s-au determinat apoi curbele de variație ale tensiunilor principale σ_1 și σ_2, prezentate în fig. 4.70.

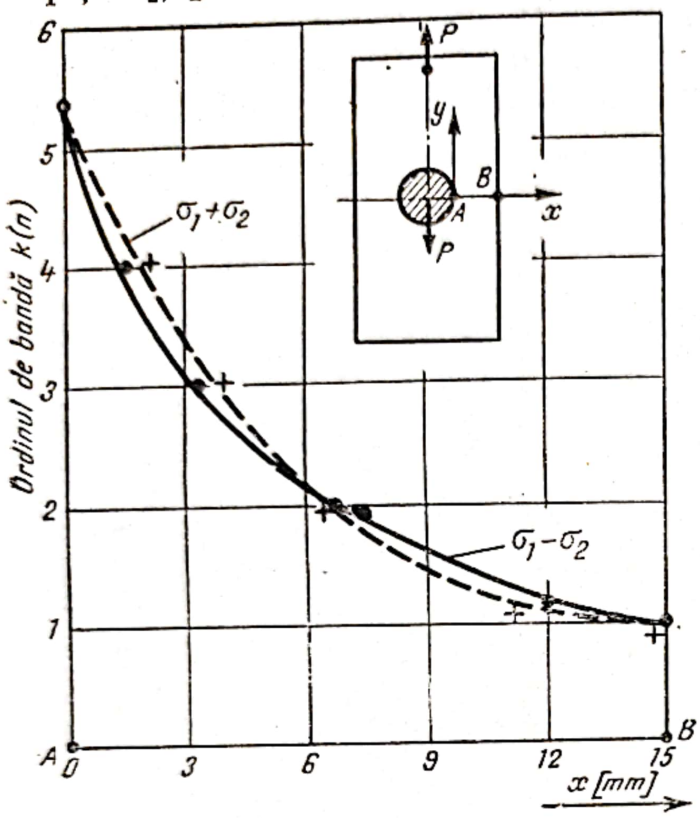


Fig. 4.69.

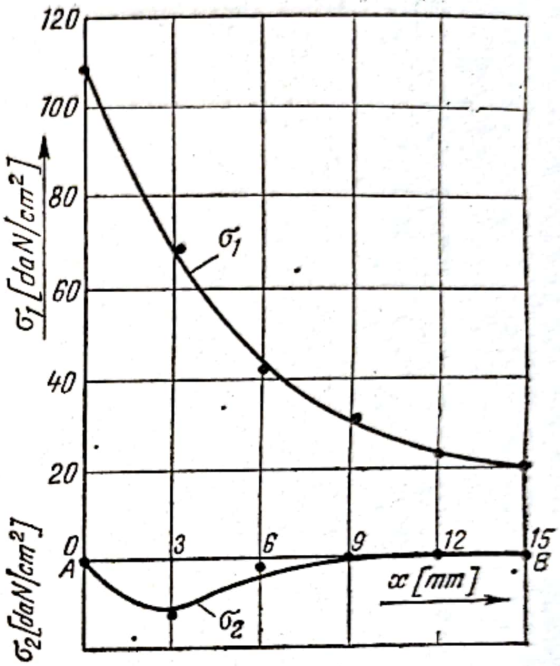


Fig. 4.70.

4.9. FOTOELASTICITATEA SPAȚIALĂ

Procedeele experimentale și metodologia de lucru folosită pentru analiza stării de tensiune din piese, prezentate în subcapitolele anterioare, se referă în exclusivitate la starea plană de solicitare. În practică însă se întîlnesc foarte multe probleme de analiza stării de tensiune care datorită geometriei complicate pe care o prezintă corpurile au un caracter tridimensional. Asemenea probleme nemaiputînd fi abordate cu tehnicile de lucru specifice fotoelasticității bidimensionale, a fost necesar să se dezvolte noi procedee fotoelastice de investigație, proprii stării spațiale de solicitare.

Diversitatea problemelor ridicate de practica inginerească a condus și în acest caz la o mare varietate de metode și tehnici de lucru dintre care cele mai importante sînt prezentate în continuare.

4.9.1. METODA INSERCȚIILOR OPTIC ACTIVE

Modelul spațial al piesei care urmează să fie studiată se execută dintr-un material transparent cu sensibilitatea optică foarte redusă (plexiglas). În secțiunea în care urmează să se studieze starea de tensiune se

introduce o peliculă dintr-un material transparent avînd aceleaşi caracteristici elastice cu ale modelului, dar cu sensibilitate optică ridicată. Cele două părţi rezultate din secţionarea modelului avînd între ele inserţia sensibilă (fig. 4.71, a), se asamblează prin lipire cu un adeziv transparent. Un adeziv care se foloseşte cu rezultate bune în practică este aralditul B. Modelul spaţial astfel pregătit se încarcă şi se examinează într-un polariscop cu lumină monocromatică, determinîndu-se cîmpul izocromatelor şi izoclinelor cu procedeele descrise la analiza fotoelastică în plan.

În practică, metoda prezentată cunoaşte şi alte variante determinate de anumite restricţii impuse de experimentarea modelului spaţial. Astfel în anumite situaţii înainte de introducerea peliculei, pe una din suprafeţele rezultate din secţionarea modelului se aplică un strat reflectorizant. În acest caz efectele fotoelastice care au loc în inserţia încorporată în model sînt examinate cu ajutorul unui polariscop cu reflexie. În alte cercetări experimentale [23], în modelul spaţial au fost încorporate două folii de polaroid cu axele aşezate perpendicular, care au separat din model o fişie de grosime constantă (fig. 4.71, b). În felul acesta, polariscopul este plasat chiar în interiorul modelului şi permite vizualizarea cîmpului de izocromate din zona investigată.

În cazul în care modelul spaţial este mărginit de suprafeţe curbe, pentru evitarea efectului produs de refracţia luminii, modelul se cufundă într-un lichid cu indicele de refracţie cît mai apropiat de cel al materialului modelului.

O altă variantă a acestei metode este folosită în practică pentru studiul stării de tensiune în plăcile groase. Problema care se pune în acest caz este

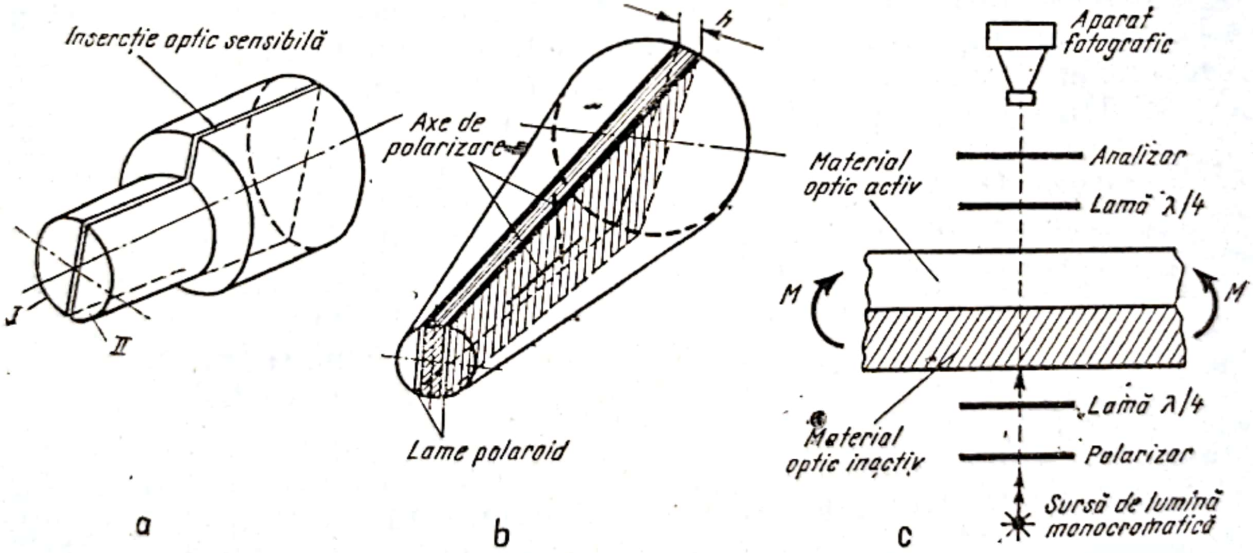


Fig. 4.71.

de a determina starea de tensiune într-un plan paralel cu planul median al plăcii. Modelul plăcii se realizează sub formă de sandvici din două materiale, unul cu sensibilitate optică ridicată, iar celălalt cu sensibilitate optică scăzută (fig. 4.71, c). Materialele trebuie să aibă aceleaşi proprietăţi

elastice. Efectul fotoelastic care se obţine în acest caz [18], prin examinarea modelului într-un polariscop cu lumină polarizată circular este cu atît mai pronunţat cu cît este mai mare diferenţa între constantele fotoelastice ale celor două materiale care alcătuiesc placa sandwich.

4.9.2. METODA FIXĂRII DEFORMAŢIEI MODELULUI

Metoda se bazează pe proprietatea materialelor fotoelastice alcătuite din polimeri, de a păstra o deformaţie permanentă după ce au fost solicitate în anumite condiţii. Prin urmare modelul spaţial al unei piese confecţionat dintr-un material fotoelastic pe bază de polimeri, solicitat după un anumit procedeu, după descărcare, poate fi investigat în diferite plane în vederea determinării stării de tensiune.

Tehnica experimentală actuală cunoaşte trei procedee de fixare a deformaţiei în modelele fotoelastice : a) procedeul curgerii, b) procedeul întăririi şi c) procedeul îngheţării tensiunilor. Procedeul îngheţării tensiunilor se utilizează pe scară largă şi cu bune rezultate în practică spre deosebire de celelalte două care se folosesc mult mai rar. În toate aceste procedee deformaţiile rămîn blocate în model la scară moleculară permiţînd astfel secţionarea modelului fără a produce modificări ale stării de deformaţie imprimată iniţial.

Pentru a explica procesul de fixare a deformaţiilor prin cele trei procedee, este necesar să se cunoască constituţia moleculară a materialelor polimerice din care se confecţionează modelele fotoelastice. Aceste materiale sînt formate dintr-un lanţ de molecule de hidrocarburi care alcătuiesc două faze cu proprietăţi diferite. O primă fază constă dintr-un lanţ de molecule dispuse într-o reţea spaţială (legături primare), care formează un schelet rigid (fig. 4.72), ale cărui proprietăţi se modifică foarte puţin cu temperatura. Cea de a doua fază, constă dintr-un număr mare de molecule, legate slab între ele prin lanţuri de dimensiuni mult mai mici (legături secundare), formînd o masă amorfă care devine vîscoasă cu creşterea temperaturii. Dacă un astfel de material este solicitat la temperatura obişnuită, încărcarea este preluată de ambele faze. Cînd încărcarea se face la temperaturi ridicate, legăturile secundare se distrug şi componenta secundară a polimerului preia o mică parte din încărcare (proporţională cu modulul de elasticitate), astfel că aproape întreaga sarcină se transmite scheletului primar care fiind mult mai solid se deformează elastic.

Dacă temperatura este coborîtă, sarcina rămînînd aplicată în continuare, masa amorfă devine din nou rigidă încorporînd scheletul primar în stare deformată. După descărcare, la temperatura camerei, masa amorfă care a fost uşor încărcată se relaxează şi împiedică elementele scheletului primar (puternic deformat) să revină în poziţia iniţială nedeformată. În felul acesta întreaga deformaţie produsă de încărcare rămîne fixată definitiv în material. Deoarece deformaţiile se fixează în material la scară moleculară, rezultă că aceste deformaţii cît şi efectele optice corespunzătoare lor se pot regăsi în orice bucată tăiată din material.

În cele ce urmează se prezintă cele trei procedee de fixarea deformaţiei insistîndu-se în mod deosebit asupra procedeului îngheţării tensiunilor.

Scanned with OKEN Scanner

a) *Procedeul curgerii.* Acest procedeu se bazează pe proprietatea pe care o au unele mase plastice (cum sînt fenolformaldehidele), de a păstra proporţionalitatea dintre sarcina aplicată şi efectul fotoelastic produs de aceasta chiar şi atunci cînd curg. În aplicarea acestui procedeu,

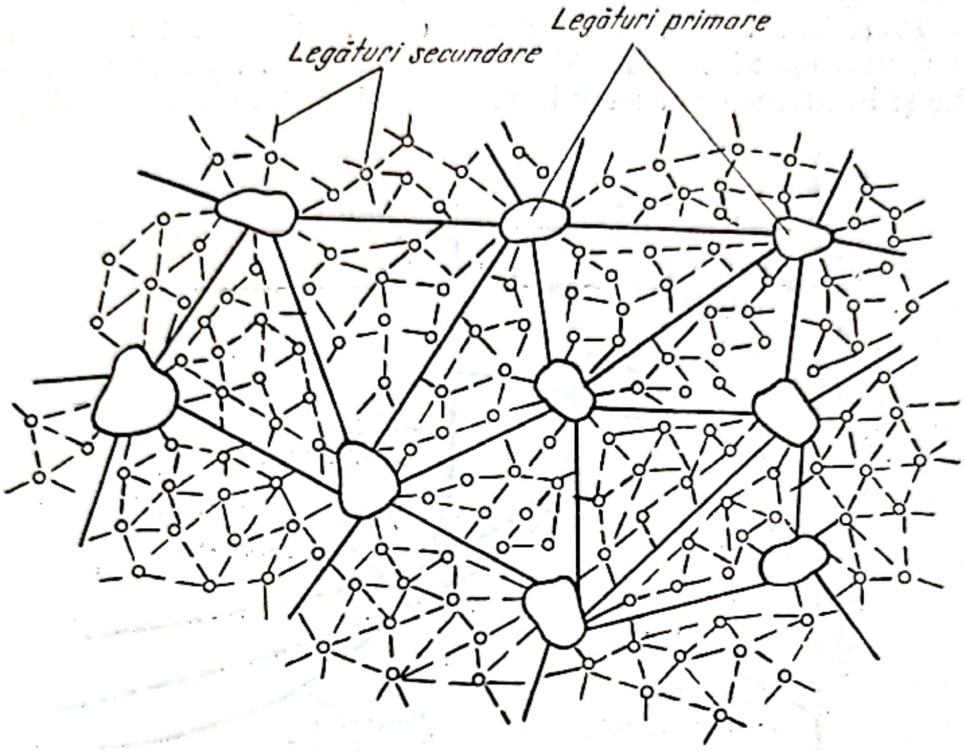


Fig. 4.72.

modelul fotoelastic tridimensional se încarcă la temperatura camerei. Sarcina se menţine cîteva ore şi în anumite situaţii, chiar o zi. Sub această sarcină modelul se deformează treptat şi odată cu aceasta creşte şi ordinul de bandă al franjelor (fig. 4.73). Dacă se îndepărtează sarcina, modelul îşi revine brusc, rămînînd însă cu o anumită deformaţie care apoi scade foarte lent în timp. Ordinul de bandă al franjelor izocromate care este proporţional cu starea de deformaţie din model, urmează aceeaşi lege de variaţie ca şi deformaţia, micşorîndu-se treptat în timp. În acest stadiu de solicitare, planele din model care urmează să fie analizate se separă sub forma unor felii subţiri, prin secţionarea modelului. Aceste felii sînt elemente plane supuse unei stări de tensiune care se studiază cu uşurinţă într-un polariscop obişnuit. Viteza de variaţie a deformaţiei (deci şi a ordinului de bandă), după descărcarea modelului este foarte mică, existînd astfel suficient timp pentru secţionarea şi analizarea elementelor plane, fără ca starea de deformaţie să se modifice vizibil. Pentru micşorarea vitezei de descărcare a modelului după suprimarea sarcinii, în practică se folosesc diferite procedee. Astfel în unele cazuri modelul fotoelastic tridimensional se confecţionează din răşini epoxidice şi se încălzeşte pînă la aproximativ 60°C (temperatură insuficientă pentru distrugerea legăturilor secundare). În acest caz viteza de curgere a materialului sub sarcină

crește considerabil (curba punctată din fig. 4.73), pe cînd timpul de răspuns al modelului (timpul după care modelul revine la starea inițială nedeformată) se prelungește la 40 de ore. Dacă modelul se răcește la temperatura camerei, înainte de suprimarea sarcinii, timpul de răspuns al modelului se extinde pînă la cîteva luni.

b) *Procedeul întăririi.* În acest caz modelul fotoelastic se toarnă dintr-o rășină epoxidică. Imediat după turnare, amestecul de monomer epoxidic și întăritor se găsește în stare lichidă. La cîteva ore după turnare

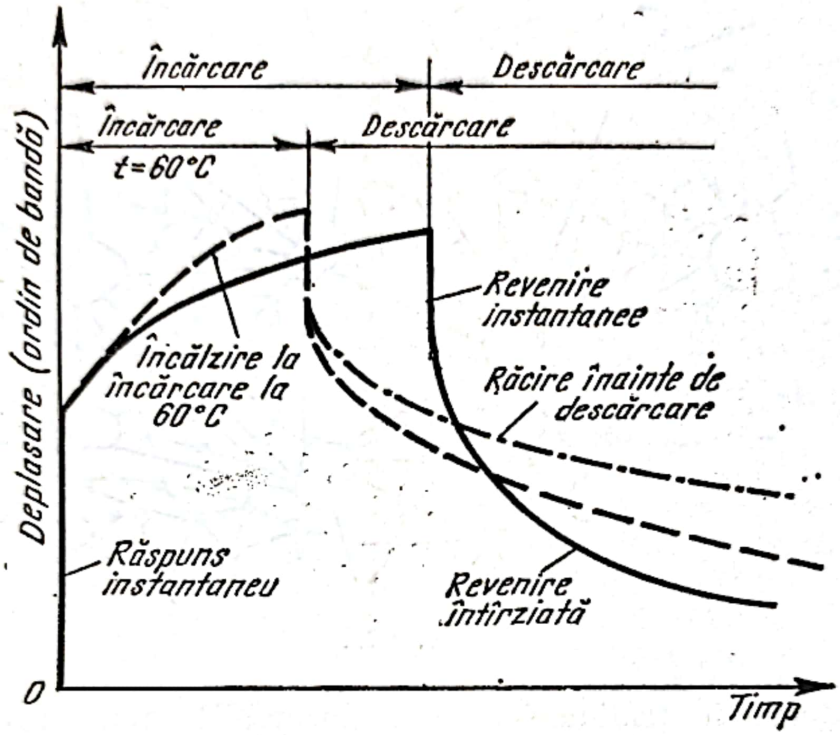


Fig. 4.73.

începe procesul de polimerizare : se formează primele legături ale lanțului molecular și rășina începe să se întărească căpătînd consistența unui cauciuc moale. În această fază modelul se încarcă, menținîndu-se sarcina un interval de timp suficient de mare, pînă cînd rășina se întărește și polimerizează complet. În acest timp se formează noi legături moleculare în jurul legăturilor inițiale deformate, care sînt blocate în această stare deformată. După încărcarea modelului, starea de deformație imprimată de sarcină rămîne neschimbată. Tensiunile corespunzătoare acestei stări pot fi vizualizate într-un polariscop obișnuit prin franjele izocromate care se formează în elementele plane rezultate în urma secționării modelului.

c) *Procedeul înghețării tensiunilor.* Modelul fotoelastic tridimensional se introduce în acest caz într-o etuvă la care temperatura poate fi variată după o lege impusă și în același timp controlată cu precizie de $\pm 5\%$. Se încălzește modelul cu o viteză relativ mare (fig. 4.74) pînă la o anumită temperatură la care legăturile secundare ale lanțului molecular se distrug. Această temperatură poartă numele de temperatură critică și este indicată de producător alături de celelalte constante care caracterizează proprietă-

Scanned with OKEN Scanner

ţile fizice ale materialului fotoelastic. După atingerea temperaturii critice, modelul fiind în etuvă, se încarcă cu sarcinile impuse experimentului. Modelul încărcat se menţine la temperatura critică 2 la 4 ore, astfel ca temperatura să se uniformizeze în toată masa. Prin aceasta toate legăturile lanţului secundar de molecule sînt distruse, şi întreaga încărcare este preluată de lanţul de legături primare care se deformează considerabil. În

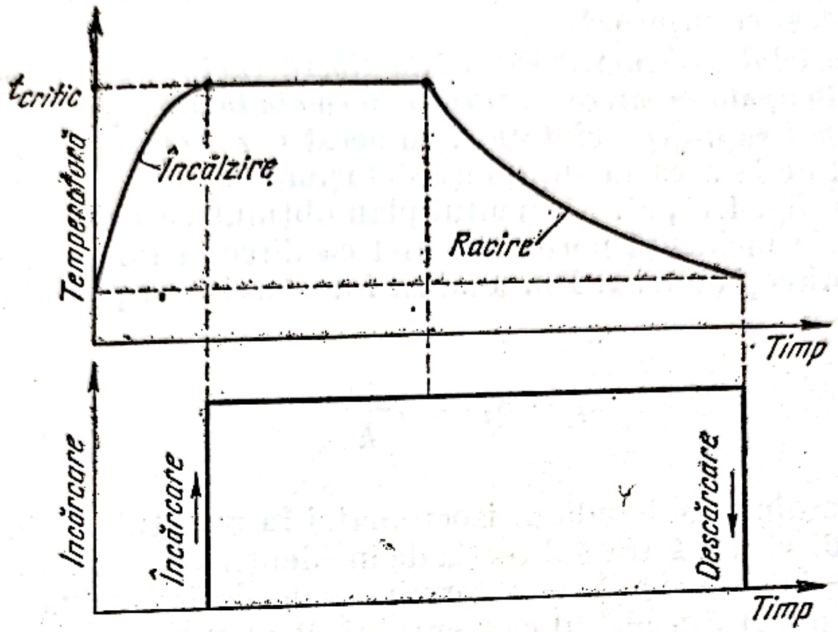


Fig. 4.74.

continuare modelul se răceşte suficient de lent, astfel ca gradientul temperaturii să fie minim, menţinîndu-se încărcarea. În urma procesului de răcire lanţul legăturilor secundare se reface încorporînd în masa amorfă care se formează, scheletul deformat al lanţului cu legături primare. După înlăturarea sarcinii deformaţia totală a modelului suferă o uşoară scădere ca urmare a descărcării fazei amorfe. Deoarece faza amorfă împiedică legăturile deformate ale lanţului primar să revină la forma iniţială nedeformată, cea mai mare parte a deformaţiei rămîne imprimată la scară moleculară în materialul modelului. Deformaţia păstrîndu-se neschimbată modelul spaţial poate fi secţionat în elemente plane care apoi se analizează pe cale fotoelastică obişnuită în vederea determinării stării de tensiune.

4.9.3. SECŢIONAREA MODELELOR ŞI PRELUCRAREA DATELOR

După fixarea deformaţiilor în model printr-unul din procedeele prezentate mai sus, se trece la determinarea stării de tensiune. În acest scop, din modelul fotoelastic tridimensional se taie o serie de elemente plane (felii), din zonele în care urmează să fie investigată starea de tensiune. Aceste elemente plane desprinse din model prin secţionare sînt analizate într-un polariscop, determinîndu-se starea de tensiune particulară existentă în fiecare element. În această analiză se consideră că grosimea ele-

Scanned with OKEN Scanner

mentului plan secţionat din model este suficient de mică în raport cu dimensiunile modelului şi prin urmare tensiunile nu variază nici în mărime şi nici în direcţie de-a lungul grosimii elementului.

Alegerea planelor de secţionare depinde de geometria modelului, de modul de încărcare şi bineînţeles de informaţiile pe care trebuie să le dea analiza. În secţionarea modelelor există cîteva reguli în legătură cu alegerea planelor de secţionare de care trebuie să se ţină seama şi care se prezintă în cele ce urmează.

Dacă modelul prezintă o suprafaţă liberă (neîncărcată) aceasta este o suprafaţă principală deoarece tensiunile normale la suprafaţă şi cele tangenţiale din planul suprafeţei sînt nule. În acest caz secţionarea modelului se face pornind de la această suprafaţă detaşîndu-se un element plan (felie) de grosime h (fig. 4.75, a). Elementul plan obţinut se examinează într-un polariscop prin incidenţă normală astfel ca direcţia razelor de lumină să coincidă cu direcţia axei z. Din analiza fotoelastică în planul elementului rezultă

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k_z \frac{\sigma_0}{h} \tag{4.127}$$

unde k_z este ordinul de bandă al izocromatei în punctul A din planul elementului. Indicele lui k arată direcţia de incidenţă a luminii din polariscop.

Uneori este necesar să se determine valorile individuale ale tensiunilor într-un punct din planul elementului. Pentru aceasta, din elementul plan se taie un subelement de lăţime h_1(fig. 4.75, b) care se analizează în polariscop, astfel ca lumina care-l traversează să fie paralelă cu axa y. În acest caz rezultă

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_y \frac{\sigma_0}{h_1}. \tag{4.128}$$

Deoarece în acest caz pentru $z = 0$, $\sigma_3 = 0$, rezultă

$$\sigma_1 = k_y \frac{\sigma_0}{h_1}.$$

Combinînd (4.127) şi (4.128), se obţine

$$\sigma_2 = \sigma_0 \left(\frac{k_y}{h_1} - \frac{k_z}{h} \right). \tag{4.129}$$

Un alt procedeu de determinare a valorilor individuale ale tensiunilor constă în secţionarea subelementului din fig. 4.75, b, astfel ca să se obţină un paralelipiped cu dimensiunile : h_3 (în lungul axei x), h_1 (în lungul axei y) şi h (în lungul axei z), aşa cum se arată în fig. 4.75, c. Din examinarea paralelipipedului în polariscop pe cele trei direcţii posibile se obţin trei relaţii de legătură din care rezultă valorile tensiunilor principale.

Scanned with OKEN Scanner

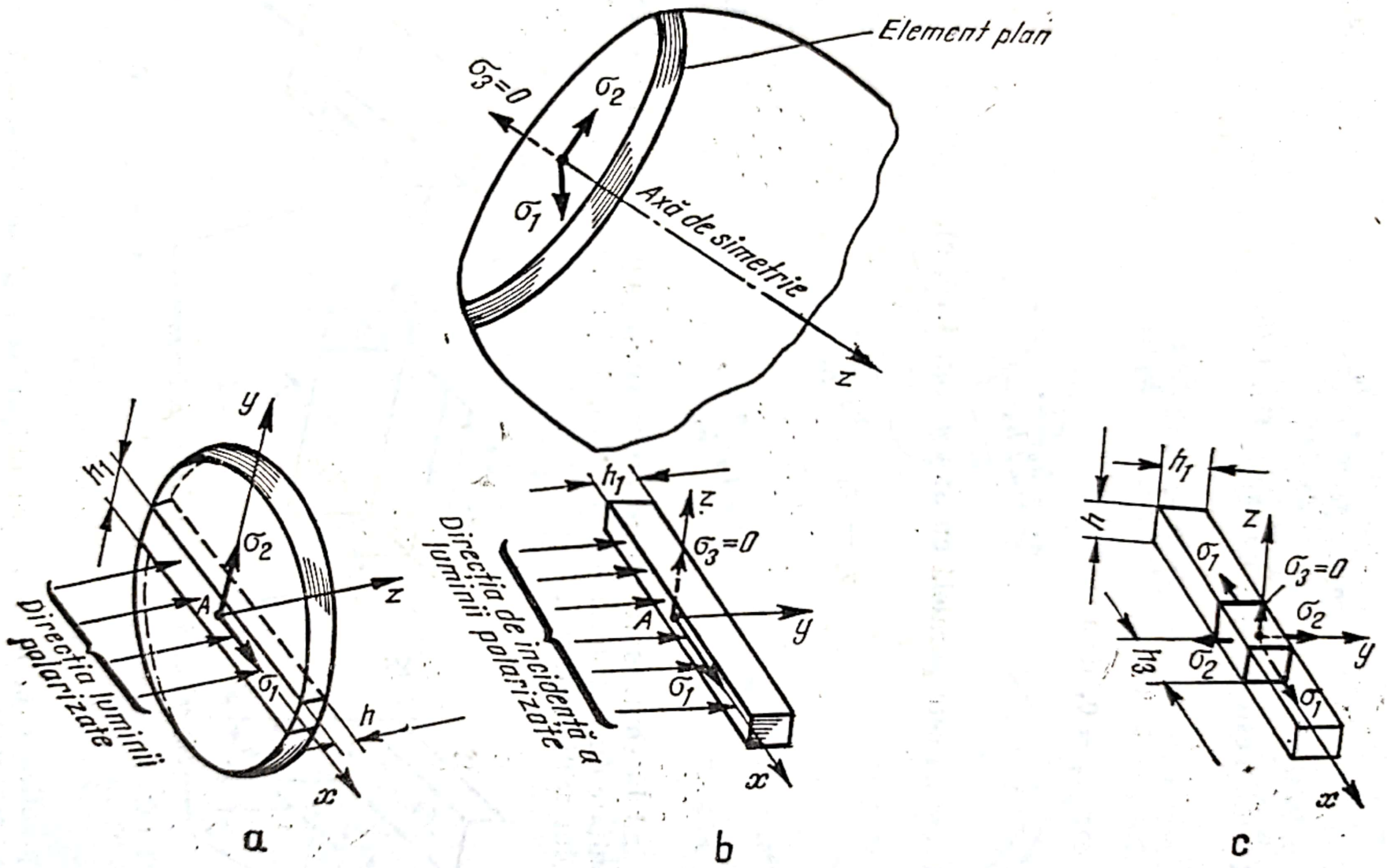


Fig. 4.75.

Scanned with OKEN Scanner

Cînd lumina este paralelă cu axa z (fig. 4.76, a).

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k_z \frac{\sigma_0}{h}. \tag{4.130}$$

Cînd lumina este paralelă cu axa x (fig. 4.76, b),

$$\sigma_2 - \sigma_3 = k_x \frac{\sigma_0}{h_3}. \tag{4.131}$$

În acest caz $\sigma_3 = 0$, deci

$$\sigma_2 = k_y \frac{\sigma_0}{h_3}. \tag{4.132}$$

Cînd lumina este paralelă cu axa y (fig. 4.76, c),

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_y \frac{\sigma_0}{h_1}$$

sau

$$\sigma_1 = k_y \frac{\sigma_0}{h_1}. \tag{4.133}$$

Aplicînd în continuare aceste procedee și pentru celelalte elemente plane rezultate din secționarea modelului, se determină starea de tensiune din modelul tridimensional.

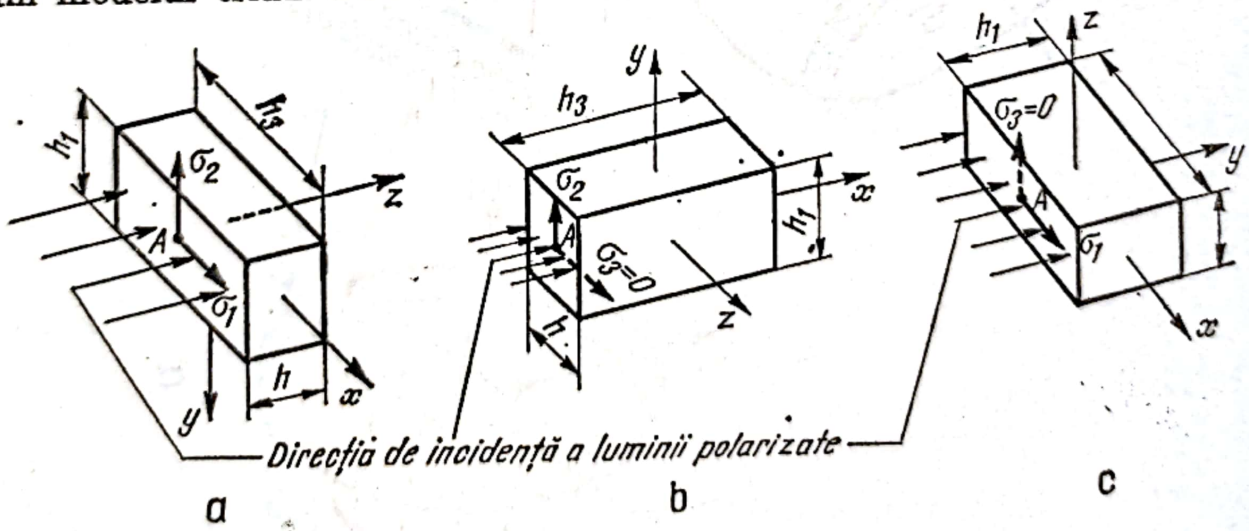


Fig. 4.76.

În practica experimentală se obișnuiește să se folosească ambele procedee prezentate și să se compare datele, stabilindu-se în final niște valori medii ale acestor date.

Scanned with OKEN Scanner

Uneori modelele tridimensionale conţin plane de simetrie care sînt plane principale. Astfel, planul diametral al modelului din fig. 4.77 este un plan principal. Rezultă că toate celelalte plane circumferenţiale perpendiculare pe acest plan sînt de asemenea plane principale.

În această situaţie este indicat să se secţioneze modelul cu un plan diametral şi o serie de plane circumferenţiale. Examinînd aceste elemente plane în polariscop se obţin datele necesare pentru o analiză completă a stării de tensiune.

Sînt cazuri în care elementele plane rezultate din secţionarea modelului nu fac parte din planele principale. Tensiunile σ_1' şi σ_2' (fig. 4.78) care se

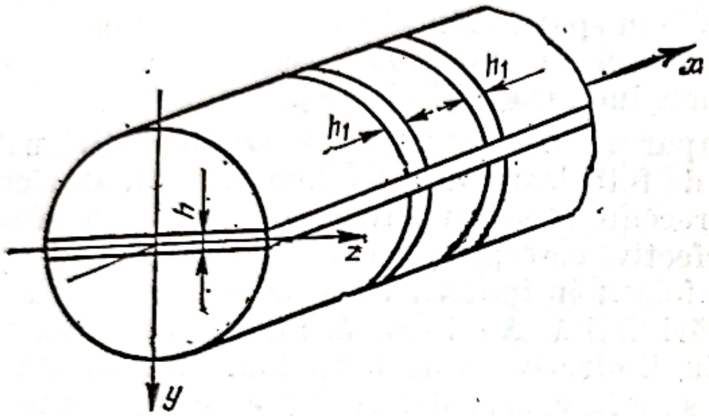


Fig. 4.77.

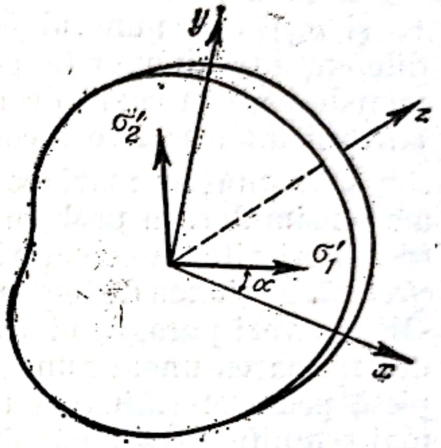


Fig. 4.78.

determină în aceste plane nu coincid cu tensiunile principale σ_1, σ_2 sau σ_3 care caracterizează starea generală de tensiune din model. De aceea, aceste tensiuni se mai numesc şi tensiuni cvasiprincipale sau tensiuni principale secundare. Tensiunile cvasiprincipale din planul elementului sînt date de expresia (1.9) şi anume

$$\sigma_1', \sigma_2' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \tag{4.134}$$

Unghiul pe care tensiunea σ_1' îl face cu axa Ox este dat de relaţia (1.10)

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}. \tag{4.135}$$

Franjele fotoelastice (izocromatele şi izoclinele) observate în polariscop corespund tensiunilor din planul elementului şi nu depind de componenta tensiunii pe direcţia axei Oz. Prin urmare, izocromata care trece printr-un punct din plan este

$$(\sigma_1' - \sigma_2')_{xy} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = k_s \frac{\sigma_0}{h}. \tag{4.136}$$

Scanned with OKEN Scanner

Parametrii izoclinei din punctul respectiv exprimați în funcție de tensiuni, rezultați din (4.135) sînt

$$\sin 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}$$

$$\cos 2\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}. \tag{4.137}$$

Pentru a determina complet starea de tensiune (σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz} și σ_{zx}) din punctul considerat, este necesar să se folosească metoda diferenței tensiunilor tangențiale în spațiu. Nu se va insista asupra acestei metode care în cazul de față este mult mai laborioasă, de aceea pentru cititorii interesați se recomandă lucrările [6] și [18].

Dificultățile mari care apar în determinarea valorilor individuale ale tensiunilor, în problemele de fotoelasticitate tridimensională, au făcut ca în majoritatea cercetărilor recente să se introducă noțiunea de *tensiune efectivă*. Noțiunea de tensiune efectivă corespunde criteriului Huber-Hencky-Mises (vezi paragraful 1.5.3) folosit în ipoteza IV-a de rezistență pentru determinarea unei anumite stări limită. Analiza stării de tensiune dintr-o piesă prin determinarea tensiunii efective, este mult mai concludentă și mai semnificativă decît dacă s-ar face prin determinarea componentelor separate ale tensiunilor.

Tensiunea efectivă într-un punct, determinată din expresia lucrului mecanic pentru modificarea formei este dată de relația

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]. \tag{4.138}$$

Pentru determinarea *tensiunii efective* într-un punct din model, în jurul punctului respectiv se decupează un cub avînd o orientare oarecare (fig. 4.79). Cubul este examinat în polariscop prin incidență normală, pe trei fețe perpendiculare, notîndu-se cu k_x, k_y și k_z ordinele de bandă determinate și cu θ_x, θ_y, θ_z parametrii izoclinei înregistrate în punctul considerat.

Expresia tensiunii efective (4.138) mai poate fi scrisă sub forma

$$\sigma_e^2 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1). \tag{4.139}$$

Ținînd seama că

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \mathcal{I}_1^2 + 2\mathcal{I}_2$$

$$\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 = \mathcal{I}_2$$

unde cu $\mathcal{I}_1$ și $\mathcal{I}_2$ s-au notat invarianții tensiunilor [2], [46] și avînd în vedere expresiile acestora [46], după unele transformări, expresia tensiunii

Scanned with OKEN Scanner

efective poate fi scrisă sub forma

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{4}\left\{[(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2]\left[2 + \frac{4\tau_{yz}^2}{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2}\right]\right.$$
$$+ [(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2]\left[2 + \frac{4\tau_{xz}^2}{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}\right] \qquad (4.140)$$
$$\left. + [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2]\left[2 + \frac{4\,\tau_{xy}^2}{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}\right]\right.$$

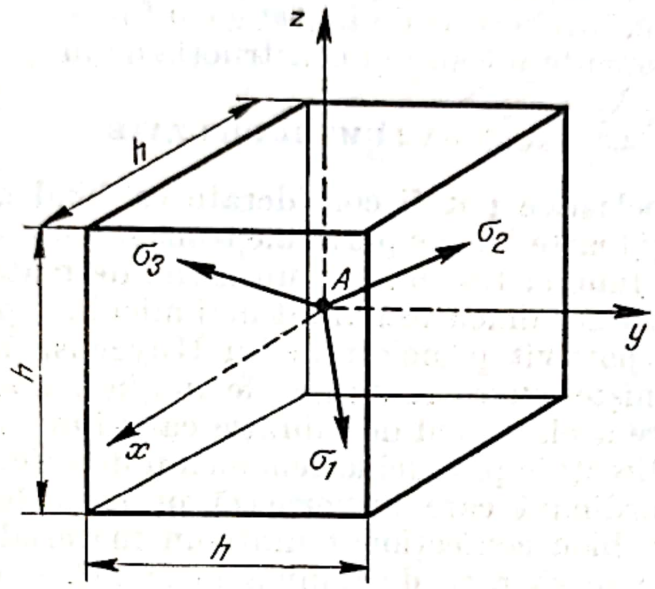


Fig. 4.79.

Izocromatele înregistrate prin cele trei determinări, potrivit (4.136), conduc la următoarele expresii

$$\left(k_x \frac{\sigma_0}{h}\right)^2 = [\sigma_1' - \sigma_2']_{yz}^2 = (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2$$
$$\left(k_y \frac{\sigma_0}{h}\right)^2 = [\sigma_1' - \sigma_2']_{xz}^2 = (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 \qquad (4.141)$$
$$\left(k_z \frac{\sigma_0}{h}\right)^2 = [\sigma_1' - \sigma_2']_{xy} = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\,\tau_{xy}^2.$$

Parametrii izoclinelor de pe cele trei fețe ale cubului sînt

$$\sin^2 2\alpha_x = \frac{4\tau_{yz}^2}{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\,\tau_{yz}^2}$$
$$\sin^2 2\alpha_y = \frac{4\tau_{xz}^2}{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} \qquad (4.142)$$
$$\sin^2 2\alpha_z = \frac{4\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Înlocuind (4.141) şi (4.142) în (4.140) rezultă

$$\sigma_e = \frac{1}{4}\left[\left(k_x \frac{\sigma_0}{h}\right)^2 (2 + \sin^2 2\alpha_x) + \left(k_y \frac{\sigma_0}{h}\right)^2 (2 + \sin^2 2\alpha_y) + \right.$$
$$\left. + \left(k_z \frac{\sigma_0}{h}\right)^2 (2 + \sin^2 2\alpha_z)\right]. \qquad (4.143)$$

Exprimarea stării de tensiune prin intermediul tensiunii efective determinate cu expresia (4.143), a permis, aprecierea mult mai exactă a modului de solicitare, într-o serie de investigaţii fotoelastice făcute recent pe modelele unor elemente folosite în construcţia de maşini.

4.9.4. METODA LUMINII DIFUZATE

Materialele fotoelastice pot fi considerate ca fiind alcătuite dintr-o suspensie uniformă şi foarte fină de particule transparente submicroscopice. Cînd un fascicul de lumină traversează un astfel de material, particulele aflate în suspensie, avînd dimensiuni mult mai mici în raport cu lungimea de undă a luminii, potrivit principiului lui Huygens, încep să vibreze comportîndu-se ca nişte surse secundare de lumină. Lumina radiată de sursele secundare are acelaşi mod de vibraţie ca şi lumina incidentă şi se transmite în toate direcţiile producînd fenomenul de difuzie. Se consideră o rază de lumină ordinară care traversează prin incidenţă normală în direcţia axei Oz, un bloc confecţionat dintr-un material fotoelastic. De asemenea se presupune că raza de lumină incidentă vibrează în planul xy (fig. 4.80). Lumina ordinară intrînd în model, excită particulele submicroscopice aflate în suspensie, care încep să vibreze în plane perpendiculare pe direcţia de propagare, producînd astfel fenomenul de difuzie.

Dacă lumina difuzată în model este privită dintr-o direcţie perpendiculară pe direcţia de propagare, va apărea polarizată într-un plan perpendicular pe axa Oz. Cînd lumina difuzată este privită în lungul unei direcţii care nu este normală pe axa Oz, gradul de polarizare al luminii scade pe măsură ce direcţia de observare se apropie de direcţia axei Oz. Acest efect de polarizare produs de lumina difuzată în model este asemănător cu cel produs de o lamă polaroid într-un polariscop. Prin urmare, folosirea luminii polarizate este echivalentă cu plasarea unei lame polarizor sau analizor în interiorul modelului, putînd fi analizată astfel starea spaţială de tensiune, fără a mai fi necesară îngheţarea tensiunilor şi secţionarea modelului.

Se presupune o rază de lumină ordinară care traversează un model fotoelastic printr-un punct P (fig. 4.81). La trecerea luminii prin model, fiecare punct situat în lungul direcţiei de propagare se comportă ca o sursă de lumină polarizată plan, avînd axa de polarizare perpendiculară pe direcţia de propagare a luminii. Se consideră un punct A pe direcţia de propagare. Dacă modelul este tensionat, lumina polarizată difuzată de microsursa din A, este descompusă în două componente perpendiculare, S_1 şi S_2 după direcţiile tensiunilor cvasiprincipale σ_1' şi σ_2' din acest punct.

Scanned with OKEN Scanner

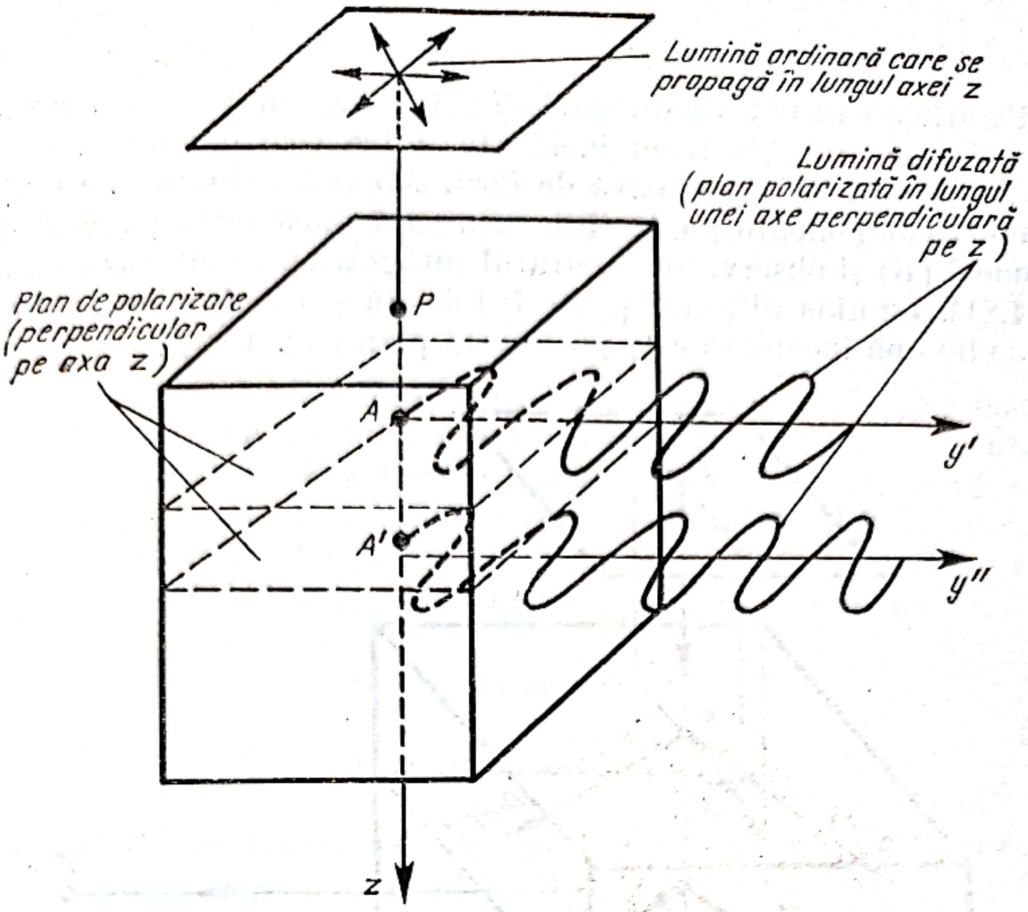


Fig. 4.80.

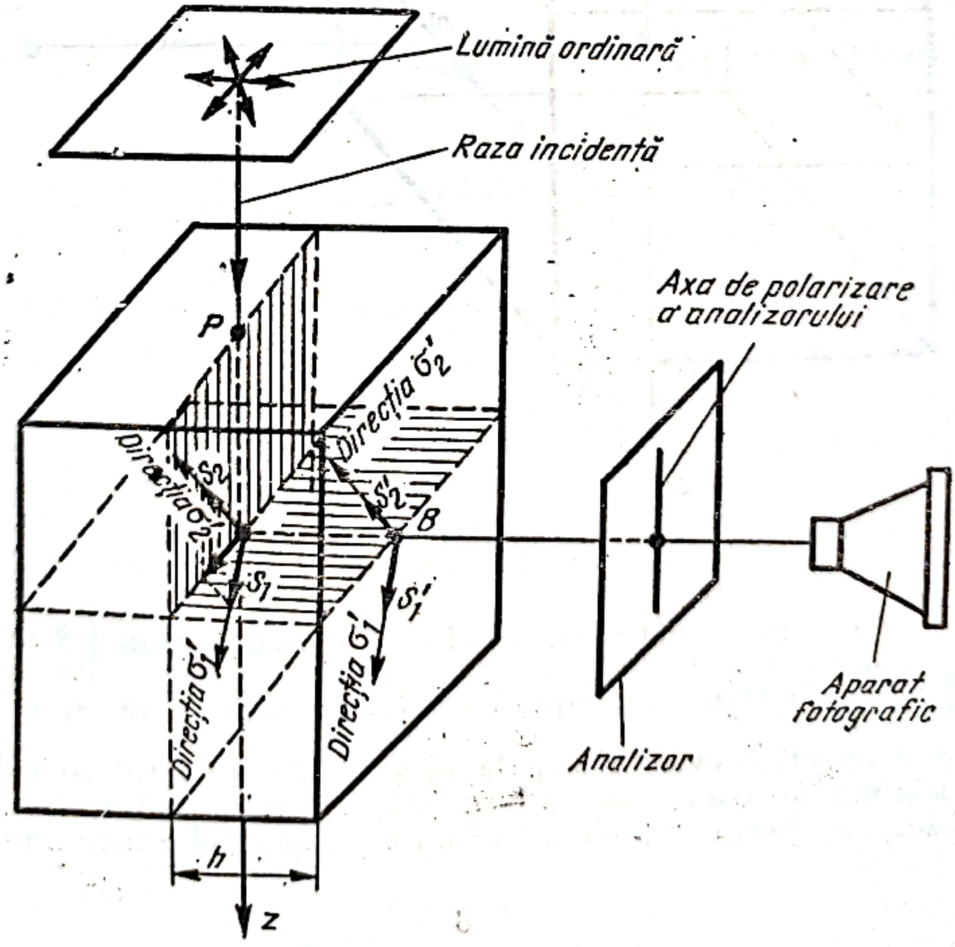


Fig. 4.81.

Pe măsură ce lumina difuzată din A se transmite spre exterior, perpendicular pe direcţia razei incidente, între cele două componente S_1 şi S_2 apare o întîrziere relativă de fază. Această diferenţă de fază dintre cele două componente poate fi determinată dacă între punctul de ieşire din model (B) şi observator (aparatul fotografic), se plasează un analizor (fig. 4.81). Lumina difuzată poate fi folosită şi cu efect de analizor dacă raza de lumină incidentă este polarizată plan (fig. 4.82).

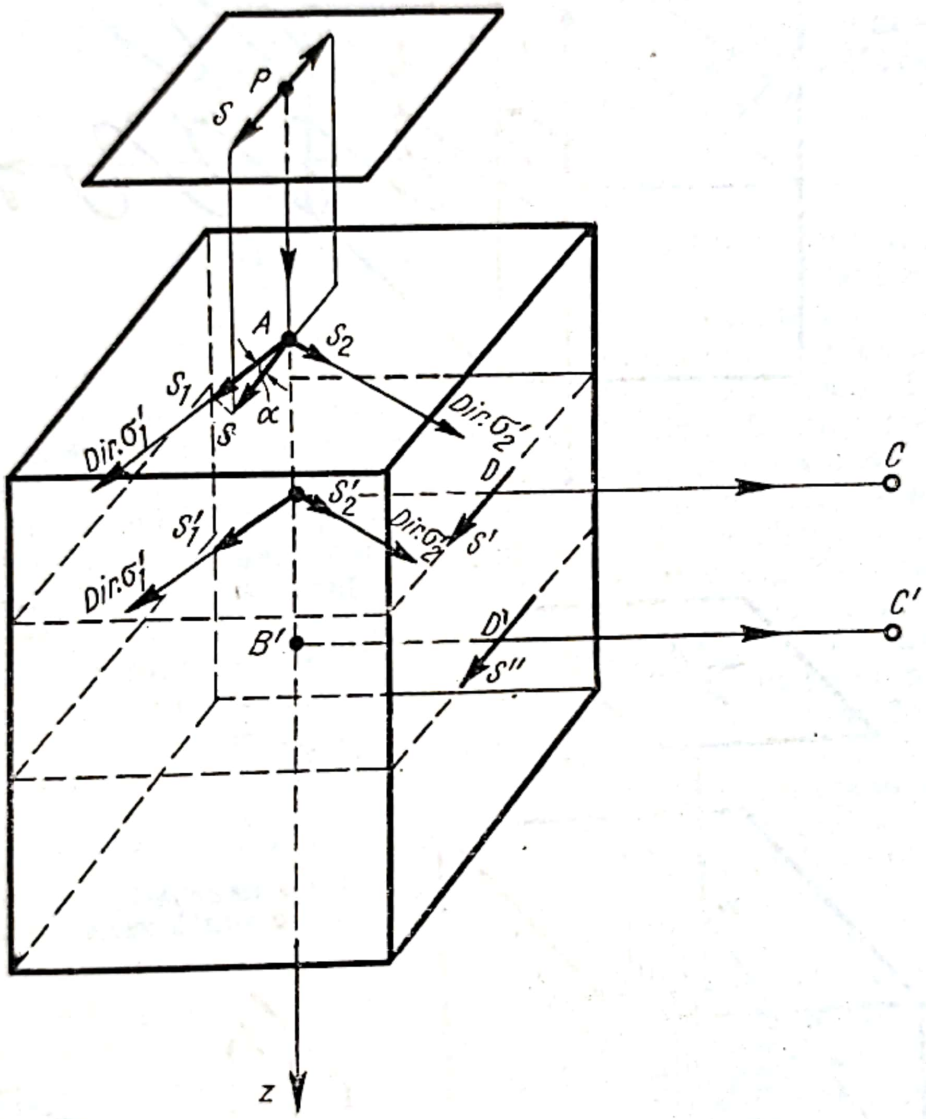


Fig. 4.82.

La intrarea în model (A), lumina polarizată plan $\left(S = a\cos pt,\right.$ unde $\left.p = \frac{2\pi c}{\lambda}\right)$, este descompusă în două componente S_1 şi S_2, după direcţiile tensiunilor cvasiprincipale σ_1' şi σ_2' din punctul considerat. În felul acesta microsursa difuzantă localizată în punctul A se comportă ca un analizor încorporat în model. Notînd cu α unghiul dintre direcţia ten-

Scanned with OKEN Scanner

siunii σ_i' și planul de polarizare al luminii incidente, expresiile celor două componente pot fi scrise astfel

$$S_1 = \gamma S \cos \alpha = \gamma a \cos pt \cdot \cos \alpha$$
$$S_2 = \gamma S \sin \alpha = \gamma a \cos pt \cdot \sin \alpha \qquad (4.144)$$

unde γ este factorul de difuzie al materialului modelului. Se consideră un punct B situat pe direcția de propagare a luminii care este observat dintr-o poziție C perpendiculară pe această direcție. Cele două componente ale luminii polarizate plan traversează distanța AB cu viteze diferite, astfel că în punctul B, între aceste componente va exista o diferență unghiulară de fază β. Expresiile celor două componente în punctul B sînt

$$S_1' = \gamma\, a \cos \alpha \cdot \cos pt$$
$$S_2' = \gamma a \sin \alpha \cdot \cos (pt + \beta). \qquad (4.145)$$

Privind modelul din punctul C pe direcția CB, va fi observată rezultanta S' a celor două componente S_1' și S_2'

$$S' = S_1' \sin\alpha - S_2' \cos \alpha. \qquad (4.146)$$

Înlocuind pe S_1' și S_2' din (4.145) în (4.146), după unele transformări se obține

$$S' = \gamma a \sin 2\alpha \cdot \cos \frac{\beta}{2} \cdot \cos \left(pt + \frac{\beta}{2} \right); \qquad (4.147)$$

Expresia (4.147) mai poate fi scrisă astfel

$$S' = A \cos \left(pt + \frac{\beta}{2} \right) \qquad (4.148)$$

unde

$$A = \gamma a \sin 2\alpha \cdot \cos \frac{\beta}{2} \qquad (4.149)$$

este amplitudinea rezultantei. Intensitatea luminii observate în punctul C este proporțională cu pătratul amplitudinii și are expresia

$$I = \gamma^2 a^2 \sin^2 2\alpha \cdot \cos^2 \frac{\beta}{2}. \qquad (4.150)$$

Scanned with OKEN Scanner

Rezultă că intensitatea luminii difuzate pe direcţia BC depinde de: unghiul dintre planul de polarizare al luminii incidente şi direcţia tensiunii σ_1' şi întîrzierea de fază între cele două componente pe distanţa AB.

Examinînd (4.150) se observă că extincţia luminii ($I = 0$) se produce în două situaţii:

a) $\sin 2\alpha = 0$, sau $\alpha = n\frac{\pi}{2}$, unde $n = 1, 2, 3, \ldots$

Dacă se consideră $n = 1$ şi $\alpha = \frac{\pi}{2}$, extincţia apare atunci cînd planul de polarizare al luminii incidente este perpendicular pe direcţia lui σ_1'. În acest caz pe direcţia de propagare a luminii incidente vor fi observate o serie de zone întunecoase care reprezintă punctele în care tensiunile principale au aceeaşi direcţie cu σ_1', deci punctele prin care trec izoclinele de un anumit unghi.

b) $\cos\frac{\beta}{2} = 0$, sau $\beta = k\pi$, unde $k = 1, 2, 3, \ldots$

Această situaţie este asemănătoare celei examinate în paragraful 4.2.3 şi se poate spune că extincţia apare cînd diferenţa liniară de fază este un multiplu întreg de lungimi de undă. Punctele întunecate care se observă în lungul razei incidente în acest caz aparţin izocromatelor de diferite ordine. Ordinul de bandă k al izocromatelor variază cu adîncimea în model a punctului care se examinează. În fig. 4.83, b, se prezintă curba de variaţie a ordinului de bandă cu adîncimea. Dacă se consideră cunoscută diferenţa tensiunilor $\sigma_1' - \sigma_2'$ într-un punct A situat la distanţa h de capătul liber al modelului (fig. 4.83, a), într-un punct A' situat la distanţa Δh de punctul A, ordinul de bandă creşte cu Δk şi, prin urmare, creşte şi diferenţa tensiunilor principale. Deoarece diferenţa tensiunilor $(\sigma_1' - \sigma_2')$ variază cu adîncimea, în punctul A' se determină o valoare medie a acestei diferenţe

$$(\sigma_1' - \sigma_2')_{med_{A'}} = \sigma_0 \frac{\Delta k}{\Delta h}. \tag{4.151}$$

Dar din fig. 4.83, b se observă că

$$\frac{\Delta k}{\Delta h} = \operatorname{tg}\ \theta.$$

Prin urmare diferenţa tensiunilor într-un punct situat în lungul axei Oz se obţine înmulţind constanta fotoelastică a modelului σ_0 cu tangenta unghiului făcut de tangenta geometrică dusă în punctul respectiv la curba $k = f(h)$.

După cum s-a putut vedea, prin utilizarea acestei metode se obţin simultan izoclinele şi izocromatele care de multe ori sînt greu de deosebit. De aceea instalaţiile moderne de investigaţie a modelelor spaţiale care

Scanned with OKEN Scanner

utilizează metoda luminii difuzate sînt echipate cu lame sfert de undă şi compensatoare destinate să separe cele două familii de curbe.

Polariscopul cu lumină difuzată diferă substanţial de un polariscop standard folosit în cercetările obişnuite de fotoelasticitate. Un astfel de

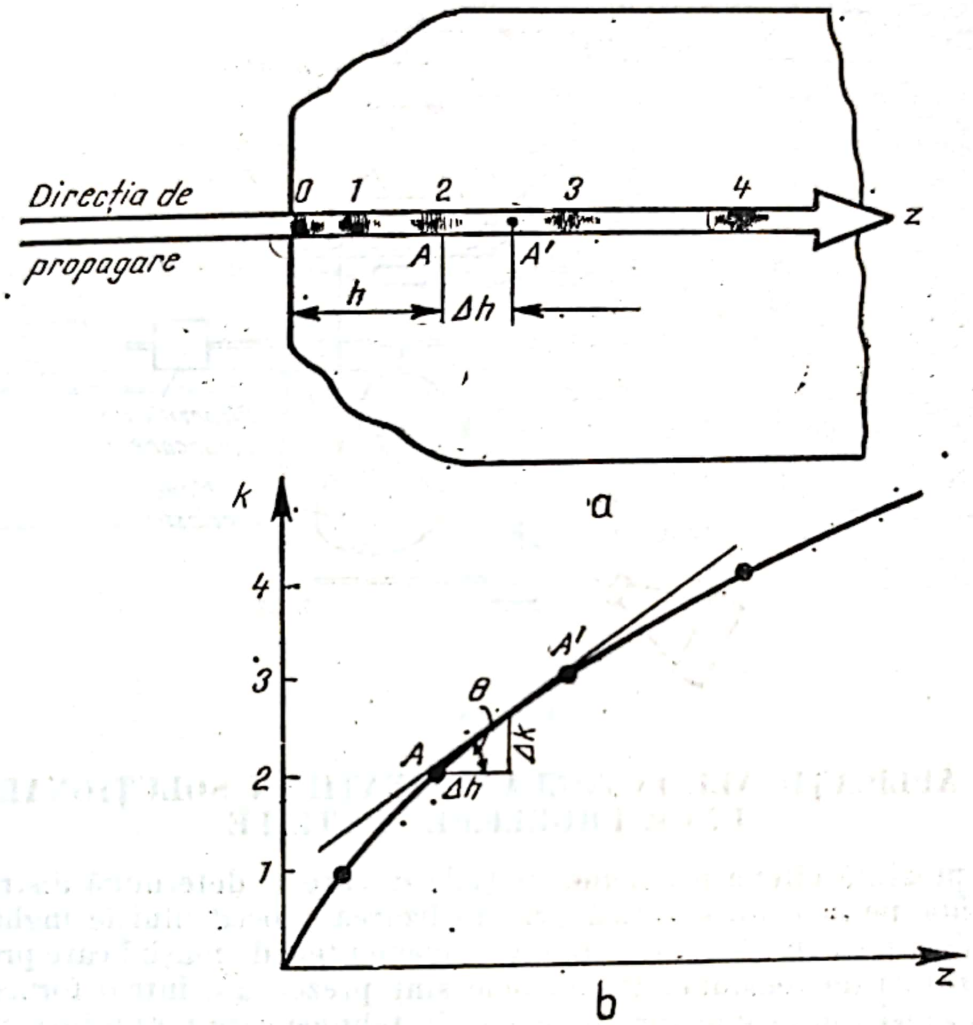


Fig. 4.83.

polariscop (fig. 4.84) se compune dintr-o sursă puternică de lumină care în instalaţiile moderne o constituie un laser cu gaz. Utilizarea laserului ca sursă de lumină aduce o serie de simplificări ale echipamentului folosit, prin faptul că sursa emite un fascicul coerent foarte fin de lumină polarizată plan. Fasciculul este desfăcut şi transformat într-un fascicul paralel, printr-un sistem de lentile. Un paravan prevăzut cu o fantă de 1 ... 1,5 mm lăţime aşezat perpendicular pe direcţia fasciculului, face ca modelul să fie traversat de o pînză luminoasă în planul în care urmează să se determine starea de tensiune. Modelul spaţial este cufundat în acest caz într-o cuvă cu pereţi transparenţi în care se găseşte un lichid cu indicele de refracţie apropiat de cel al materialului modelului, pentru a evita efectele dăunătoare ale refracţiei. Pentru înregistrarea franjelor fotoelastice polariscopul este echipat cu un aparat fotografic orientat cu axa optică perpendiculară

Scanned with OKEN Scanner

pe direcţia fasciculului laser. Aparatul fotografic este fixat pe un cadru care se poate roti în jurul modelului astfel ca fotografierea să se poată face sub orice unghi.

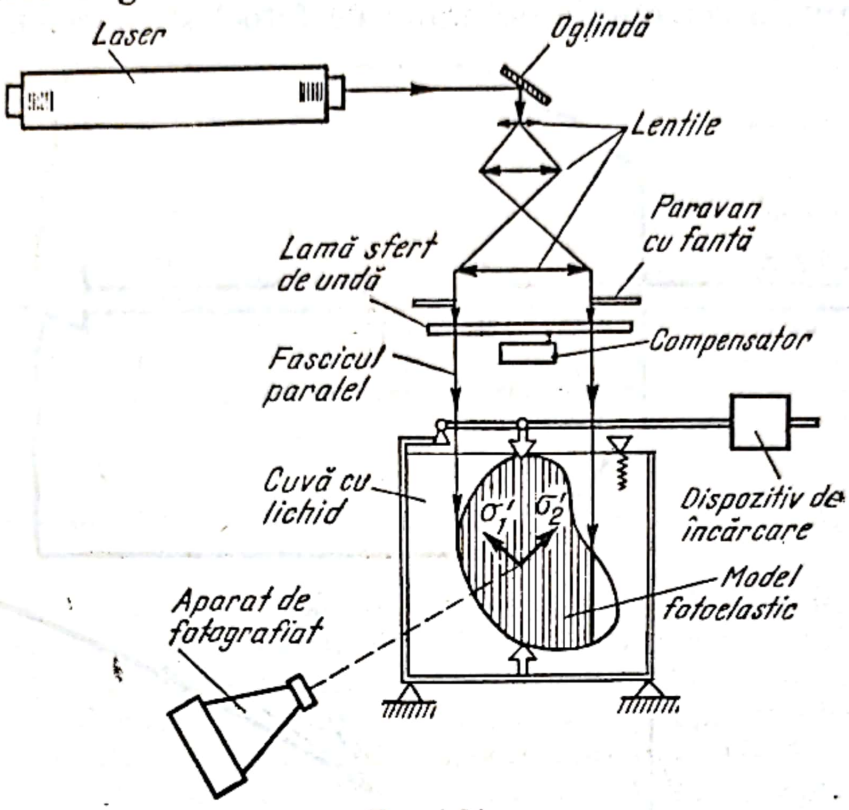


Fig. 4.84.

4.10. APLICAŢII ALE FOTOELASTICITĂŢII ÎN SOLUŢIONAREA UNOR PROBLEME SPAŢIALE

Se prezintă cîteva probleme spaţiale în care se determină distribuţia tensiunilor pe cale fotoelastică prin utilizarea procedeului de îngheţarea tensiunilor. Exemplele alese se referă la elementele de maşini care prezintă concentratori de tensiune. Problemele sînt prezentate într-o formă concentrată, insistîndu-se asupra unor detalii tehnice care nu au fost prezentate anterior cît şi asupra rezultatelor finale.

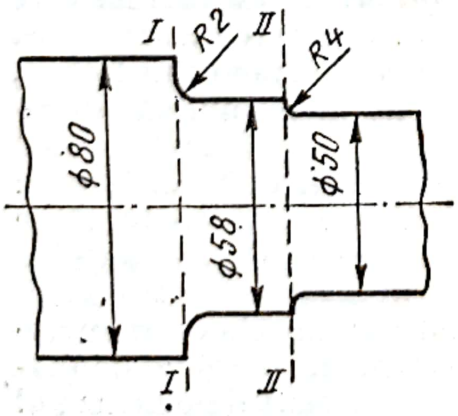
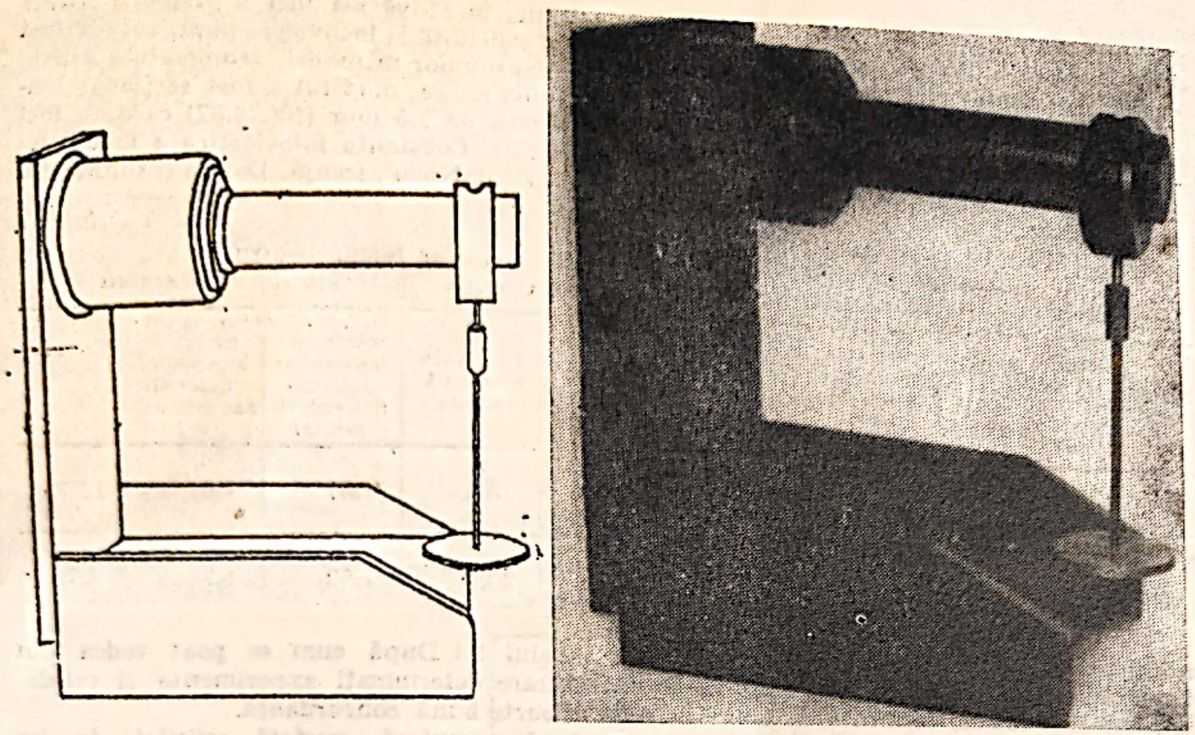
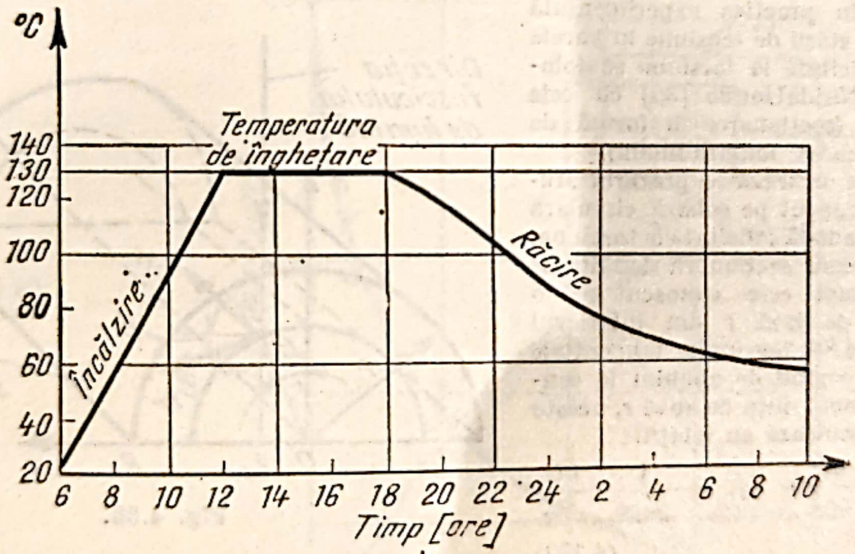


Fig. 4.85.

Aplicaţii. 1° : *Concentrarea tensiunilor în fuzeta unui autocamion* [4]. Fuzetele sînt elemente de rezistenţă care fac parte din mecanismul de direcţie al autovehiculelor. Deşi în practică aceste elemente cunosc o mare variatate de forme constructive, în majoritatea cazurilor piesele prezintă variaţii ale secţiunii în trepte, cu zone de concentrare a tensiunilor. Studiul distribuţiei tensiunilor în aceste zone are o deosebită importanţă în calculele de rezistenţă, pentru determinarea coeficientului efectiv de concetrarea tensiunilor. Forma şi dimensiunile fuzetei în zona cu concentratori se prezintă în fig. 4.85. Modelul fotoelastic al acestei regiuni a fost turnat din araldit B şi apoi prelucrat reproducîndu-se astfel, toate detaliile din zona concentratorilor. După prelucrare, modelul a fost introdus într-o etuvă şi solicitat la încovoiere cu dis-



a



b

Fig. 4.86.

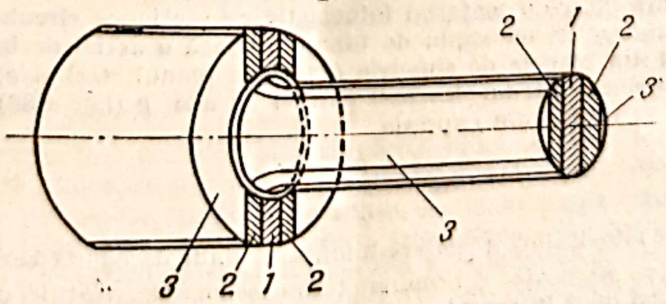


Fig. 4.87.

pozitivul din fig. 4.86, a. Odată cu modelul fotoelastic, în etuvă s-a mai introdus o baretă cu grosimea de 7,5 mm, turnată din același material și solicitată la încovoiere pură, care a fost folosită apoi pentru etalonare. În vederea înghețării tensiunilor în model, temperatura etuvei a fost reglată după ciclul prezentat în fig. 4.86, b. După răcire, modelul a fost secționat longitudinal, obținîndu-se trei elemente plane cu grosimea de 7,5 mm (fig. 4.87) care au fost analizate într-un polariscop cu lumină polarizată circular. Constanta fotoelastică a modelului determinată pe bara de etalonare a fost găsită $\sigma_0 = 4{,}81$ daN/cm². franjă. Datele rezultate din

Tabelul 4.4

Datele experimentale și rezultatele calculelor făcute pentru determinarea coeficienților de concentrare a tensiunilor în fuzeta de autocamion

Secțiunea	Momentul încovoietor (daN·cm)	Modulul de rezistență (cm³)	Constanta fotoelastică a modelului (daN/cm²·fr)	Ordinul de bandă maxim determinat	Tensiunea maximă determinată (daN/cm²)	Tensiunea nominală (daN/cm²)	Coef. de concentr. a tensiunilor determinat experimental	Coef. de concentr. a tensiunilor determinat prin calcul	Eroarea %
I	46,5	2,53	4,81	6	28,86	18,4	1,57	1,6	1,875
II	43,5	2,08	4,81	7	33,67	20,9	1,62	1,7	4,7

determinările fotoelastice sînt concentrate în tabelul 4.4 După cum se poat vedea din examinarea tabelului 4.4, între coeficienții de concentrare determinați experimenta și cei determinați prin calcul, după metoda Neuber, există o foarte bună concordanță.

2°. *Studiul distribuției tensiunilor într-o bară circulară crestată solicitată la tor siune* [40], În practica experimentală pentru studiul stării de tensiune în barele prismatice solicitate la torsiune se folosește metoda NisidaHondo [35] cu cele două procedee (secționarea în formă de pană și secționarea longitudinală).

În cele ce urmează se prezintă studiul fotoelastic făcut pe o bară circulară cu crestătură radială solicitată la torsiune, folosind procedeul secționării longitudinale. După cum este cunoscut pe o circumferință de rază r din interiorul secțiunii (fig. 4.88) tensiunile tangențiale σ_{tz} și τ_{tr} nu depind de unghiul la centru β. Pe circumferința de rază r, aceste tensiuni se calculează cu relațiile

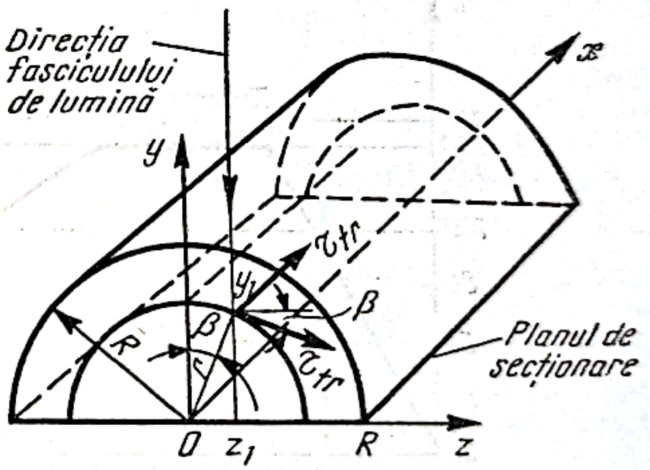


Fig. 4.88.

$$\tau_{tz} = \frac{1}{2\pi r^2} \cdot \frac{\partial U}{\partial r}, \quad \tau_{tr} = \frac{1}{2\pi r^2} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \qquad (4.152)$$

în care U este funcția de tensiune care trebuie să satisfacă ecuația lui Poisson și condițiile de contur.

Se consideră o bară dintr-un material fotoelastic cu secțiunea circulară avînd înghețate în interior tensiunile produse de un cuplu de torsiune. Dacă o astfel de bară este secționată longitudinal după unul din planele de simetrie (exemplu planul zOx) și apoi este examinată în lumină polarizată circular, într-un fascicul paralel cu axa y (fig. 4.88) tensiunea tangențială τ_{tz} potrivit [35], se obține din expresia

$$\tau_{tz} = \frac{\sigma_0'}{2} \frac{\Delta k}{\Delta l} \qquad (4.153)$$

unde σ_0' este constanta fotoelastică a materialului, k ordinul de bandă corespunzător razei r. Tensiunea tangențială τ_{tr} se poate determina ținînd seama de relațiile dintre deformații și deplasări. Fiind mult mai mică în raport cu τ_{tz}, în practică această tensiune se neglijează.

Scanned with OKEN Scanner

Modelul fotoelastic a fost turnat din araldit B într-o formă cilindrică, din care apoi a fost prelucrată o bară cu secțiunea circulară ($D = 32$ mm), având o crestătură radială în formă de V. Diametrul minim al barei în dreptul crestăturii a fost de $2a = 20{,}2$ mm. După prelucrare bara a fost introdusă într-o etuvă și solicitată la torsiune cu un moment $M_t = 3{,}53$ daN·cm. Concomitent cu bara circulară în etuvă s-a mai introdus și bara pe care s-a făcut

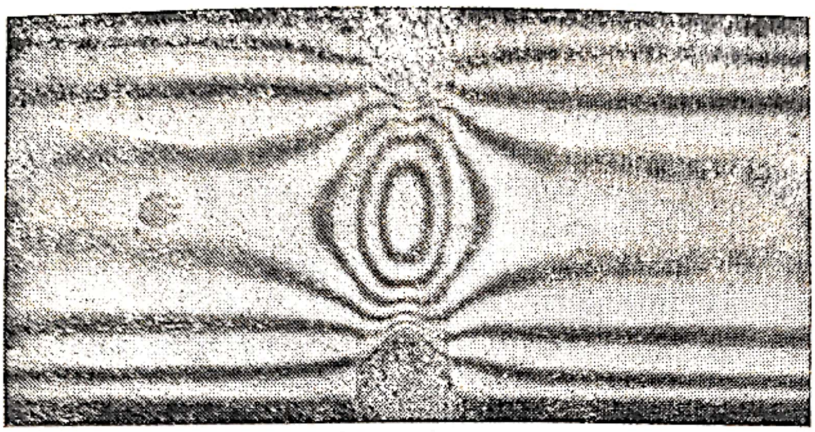


Fig. 4.89.

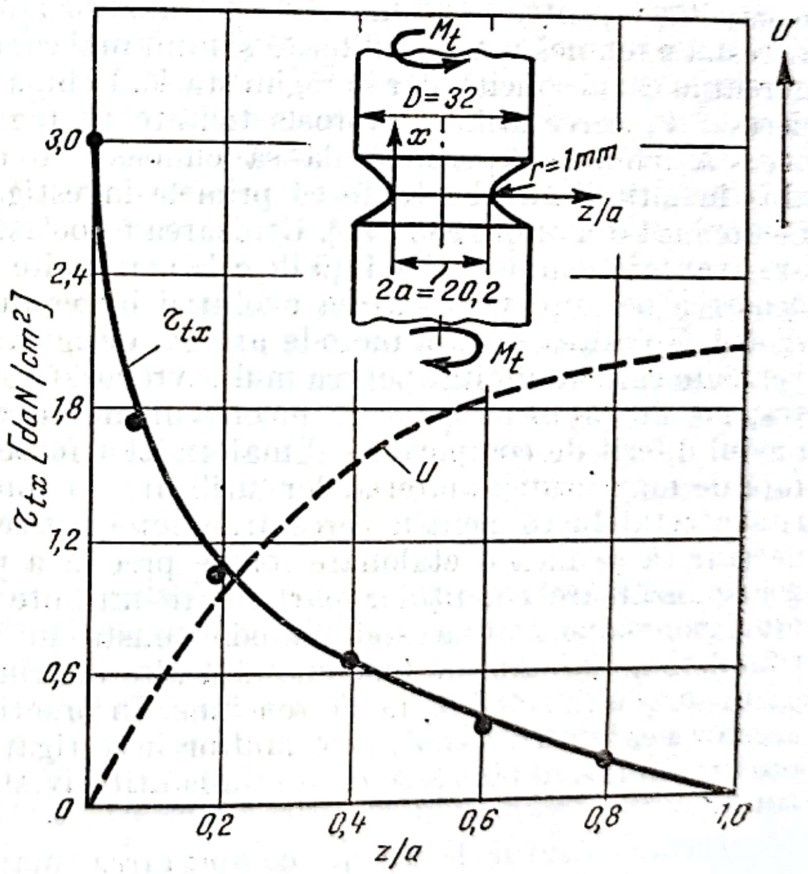


Fig. 4.90.

apoi etalonarea. Etuva a fost încălzită și apoi răcită după un ciclu termic asemănător celui din fig. 4.86, b. După etalonare a rezultat constanta fotoelastică a materialului $\sigma_0' = 0{,}289$ daN/cm²·fr. După răcire modelul fotoelastic a fost secționat după planul zOx și examinat într-un polariscop cu lumină polarizată circular. Izocromatele înregistrate în acest plan sînt prezentate în fig. 4.89. Utilizînd datele rezultate din determinările fotoelastice, în fig. 4.90 s-a trasat curba de variație a funcției de tensiune U, din care apoi prin derivare s-a determinat curba de variație a tensiunii τ_{tx} în secțiunea cu concentrator.

Scanned with OKEN Scanner

4.11. FOTOELASTICITATEA ÎN REGIM DINAMIC

4.11.1. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

Determinarea stării de tensiune generată în corpuri în urma solicitărilor dinamice constituie obiectul a numeroase cercetări teoretice și experimentale efectuate în ultima vreme. Datorită complicațiilor matematice care intervin, doar cîteva probleme simple de impact au putut fi soluționate teoretic. Majoritatea problemelor ridicate de practica inginerească neputînd fi soluționate pe cale analitică, imperativele proiectării au obligat pe cercetători să-și îndrepte privirile către metodele experimentale.

Una dintre cele mai eficiente metode de investigație experimentală a propagării fenomenelor tranzitorii, este fotoelasticitatea. Determinarea stării de tensiune în regim dinamic prin fotoelasticitate se bazează pe faptul că cele două legi fundamentale ale fotoelasticității își mențin valabilitatea și în regim dinamic, efectul optic fiind în acest caz proporțional cu grosimea modelului și diferența tensiunilor principale. Utilizarea fotoelasticității pentru studiul stărilor tranzitorii de tensiune din corpuri, necesită o tehnică complet diferită și mult mai complicată decît cea folosită curent în cazul solicitărilor în regim static. Echipamentul relativ pretențios necesar în cercetările de fotoelasticitate în regim dinamic, a făcut ca această tehnică experimentală să cunoască o dezvoltare considerabilă abia în ultimii ani, cu toate că primele investigații de acest fel au fost făcute încă din anul 1935 [47]. Utilizarea fotoelasticității în regim dinamic are avantaje semnificative față de cele mai multe procedee de investigație, deoarece permite vizualizarea evoluției întregului cîmp de tensiune din model. Folosirea acestei metode atrage, desigur, și cîteva serioase inconveniente care au limitat pentru multă vreme sfera aplicațiilor la un număr restrîns de probleme. Aceste inconveniente se referă în primul rînd la modul diferit de comportare al materialelor fotoelastice în regim dinamic față de majoritatea materialelor utilizate în construcția de mașini. Datorită acestui lucru pentru cercetările fotoelastice în regim dinamic este necesar să se facă o etalonare foarte precisă a materialelor fotoelastice, corespunzătoare condițiilor particulare întîlnite în încercarea reală. Un alt inconvenient al acestei metode constă în imposibilitatea evaluării complete a cîmpului de tensiune fără alte informații auxiliare, chiar și în cazul simplu al stării plane de tensiune. În practică de multe ori, datorită acestor neajunsuri rezultatele multor investigații s-au rezumat la interpretări calitative fără a se determin cantitativ starea de tensiune înregistrată.

Inconvenientul legat de comportarea materialelor fotoelastice în regim dinamic poate fi atribuit caracteristicilor vîscoelastice pe care le prezintă aceste materiale, cu excepția sticlei. Curgerea vîsco-elastică a materialelor birefringente determină pentru o anumită stare de tensiune aplicată, o dependență de timp și de energia disipată a deformației instantanee. Deasemenea la aceste materiale modulul de elasticitate în regim dinamic variază cu viteza de încărcare, fenomen care nu se întîlnește în cazul materialelor solicitate în domeniul elastic. Cercetările întreprinse

Scanned with OKEN Scanner

recent pe o serie de materiale fotoelastice au arătat că datorită intervalului de timp foarte scurt în care are loc propagarea undelor de tensiune, fenomenul de curgere specific acestor materiale afectează în mică măsură mecanismul de deplasare a trenului de unde. Desigur că în acest caz se înregistrează un grad mai mare de disipare a energiei decît în cazul cînd încercările ar fi executate pe un model metalic în aceleaşi condiţii.

Problemele dinamice care pot fi investigate pe cale fotoelastică se grupează în trei categorii :

a) studiul tensiunilor produse de sarcini centrifuge în discuri aflate în mişcare de rotaţie cu viteză constantă ;

b) determinarea cîmpului plan de tensiune rezultat din mişcări periodice ;

c) determinarea cîmpului de tensiune produs de perturbaţii tranzitorii.

Prima categorie de probleme poate fi redusă la un caz de solicitare statică [13], dacă modelul este încălzit şi apoi răcit treptat pînă la temperatura camerei. Franjele fotoelastice care se dezvoltă după diferite intervale de timp se înregistrează pe o peliculă prin folosirea unui stroboscop sau a unei surse puternice de lumină (flash) cu funcţionare intermitentă.

O altă metodă folosită în practică [32], constă în montarea polariscopului, echipamentului de înregistrare şi a sursei de lumină pe axa de rotaţie şi rotirea acestora cu aceeaşi viteză cu cea a modelului. Această metodă a fost folosită cu succes pînă la 20 000 rot/min. Desigur că în acest caz dimensiunile modelului şi viteza sa de rotaţie sînt limitate de rezistenţa la rupere a materialului fotoelastic.

Cîmpul de franje izocromate generate în corpuri de mişcări periodice poate fi înregistrat pe cale stroboscopică sau cu un aparat de filmat [29], folosind o sursă de lumină fie continuă, fie intermitentă. Modelul fotoelastic în acest caz se plasează în interiorul unui polariscop cu lumina polarizată circular, ca şi în cazul fotoelasticităţii în regim static.

4.11.2. STUDIUL PROPAGĂRII UNDELOR ÎN BARE

Înregistrarea franjelor fotoelastice produse de perturbaţiile tranzitorii necesită un echipament experimental mai pretenţios datorită intervalului de timp foarte scurt în care evoluează aceste franje. Primele înregistrări de acest fel [47], au fost obţinute cu un aparat de filmat care a operat cu o viteză de 64 cadre/s. Desigur că această viteză a fost cu mult prea mică pentru a reţine pe peliculă franjele fotoelastice, care au apărut deformate şi neclare. De aceea au fost imaginate procedee mai perfecţionate cu care s-a putut înregistra în bune condiţii procesul de propagare al undelor de tensiune în model. Într-un astfel de procedeu [14], lumina este trecută printr-un orificiu foarte mic practicat într-un paravan, care face ca modelul fotoelastic să fie traversat de un fascicul foarte fin de lumină. Modelul este plasat între două lame polaroid aşezate în zona în care urmează să se înregistreze evoluţia franjelor fotoelastice (fig. 4.91). Fasciculul emis de sursa de lumină traversează modelul în dreptul lamelor polaroid şi se proiectează pe un tub fotomultiplicator. Răspunsul foto-

Scanned with OKEN Scanner

multiplicatorului este introdus într-un osciloscop unde este amplificat şi înregistrat. Impactul în acest caz a fost generat prin lovirea modelului cu o alice de oţel proiectată de o puşcă cu aer comprimat. Perturbaţia locală produsă în capătul modelului în urma impactului aplicat se transmite mai departe sub forma unui tren de unde elastice care se propagă

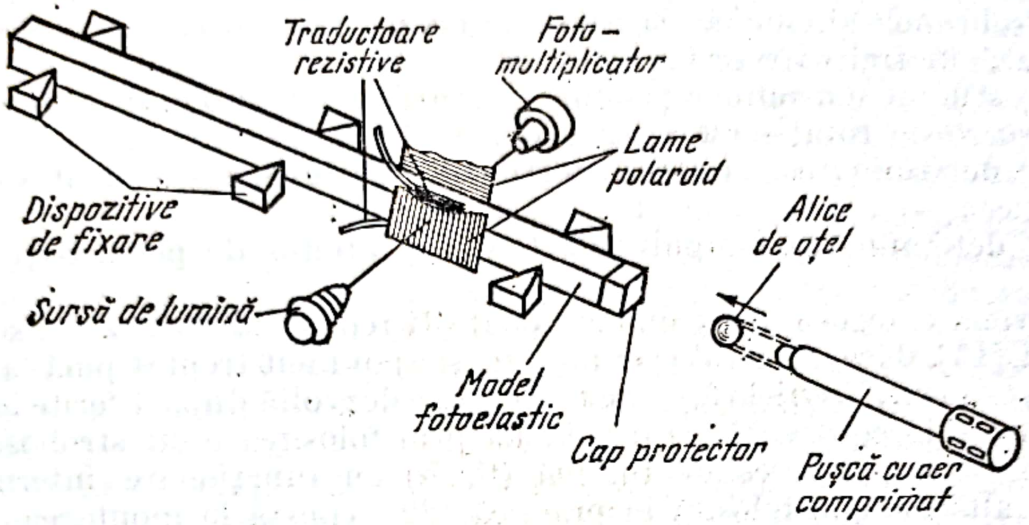


Fig. 4.91.

cu mare viteză către celălalt capăt al modelului. Ajunse în zona de înregistrare, undele elastice de tensiune sînt vizualizate sub forma unor franje întunecate care traversează succesiv fasciculul luminos transmis prin model, modificînd astfel în aceeaşi manieră intensitatea luminii care cade pe fotomultiplicator. Răspunsul fotomultiplicatorului amplificat şi vizualizat pe osciloscop pune în evidenţă franjele de tensiune care au traversat modelul prin punctul inspectat. Pentru completarea datelor fotoelastice înregistrate cu date auxiliare necesare evaluării cît mai precise a cîmpului de tensiune, pe suprafaţa modelului, în secţiunea în care este traversat de fasciculul luminos, se aplică două traductoare tensometrice conectate pe două laturi adiacente ale punţii de echilibrare. Semnalele traductoarelor sînt introduse pe un alt canal al osciloscopului şi înregistrate simultan cu răspunsul fotomultiplicatorului. Înregistrarea pe osciloscop în acest caz poate fi comandată prin semnalul transmis de un traductor tensometric plasat în apropierea capătului de impact al modelului. Semnalul transmis de acest traductor este întîrziat în mod corespunzător cu ajutorul unui dispozitiv electronic aflat de regulă pe osciloscop, astfel ca înregistrarea răspunsului celor două traductoare aflate în secţiunea inspectată, să înceapă atunci cînd frontul undei de tensiune ajunge în dreptul acestei secţiuni.

Datorită faptului că inspectarea modelului se face doar într-un singur punct, iar datele obţinute sînt insuficiente pentru a caracteriza întreaga metamorfoză a franjelor care traversează modelul, această metodă are o sferă de aplicabilitate foarte restrînsă, limitîndu-se doar la investigarea fenomenelor unidimensionale.

Scanned with OKEN Scanner

4.11.3. STUDIUL PROPAGĂRII UNDELOR ÎN PLAN

Pentru studiul propagării undelor de tensiune în spaţii cu două dimensiuni sînt necesare instalaţii mai complicate care să permită înregistrarea evoluţiei întregului cîmp de franje izocromate. Astfel în cele ce urmează se prezintă aranjamentul experimental al unei instalaţii pentru investigarea fenomenului de propagare a undelor de tensiune generate într-o placă, printr-un impact central [17]. În acest caz, în paralel cu datele fotoelastice au mai fost înregistrate şi semnalele transmise de o serie de traductoare tensometrice aplicate în diferite puncte pe ambele feţe ale modelului plăcii. Impactul a fost aplicat în centru, prin împuşcarea plăcii cu o puşcă cu aer comprimat, orientată perpendicular pe placă (fig. 4.92). Franjele izocromate au fost vizualizate prin utilizarea unui

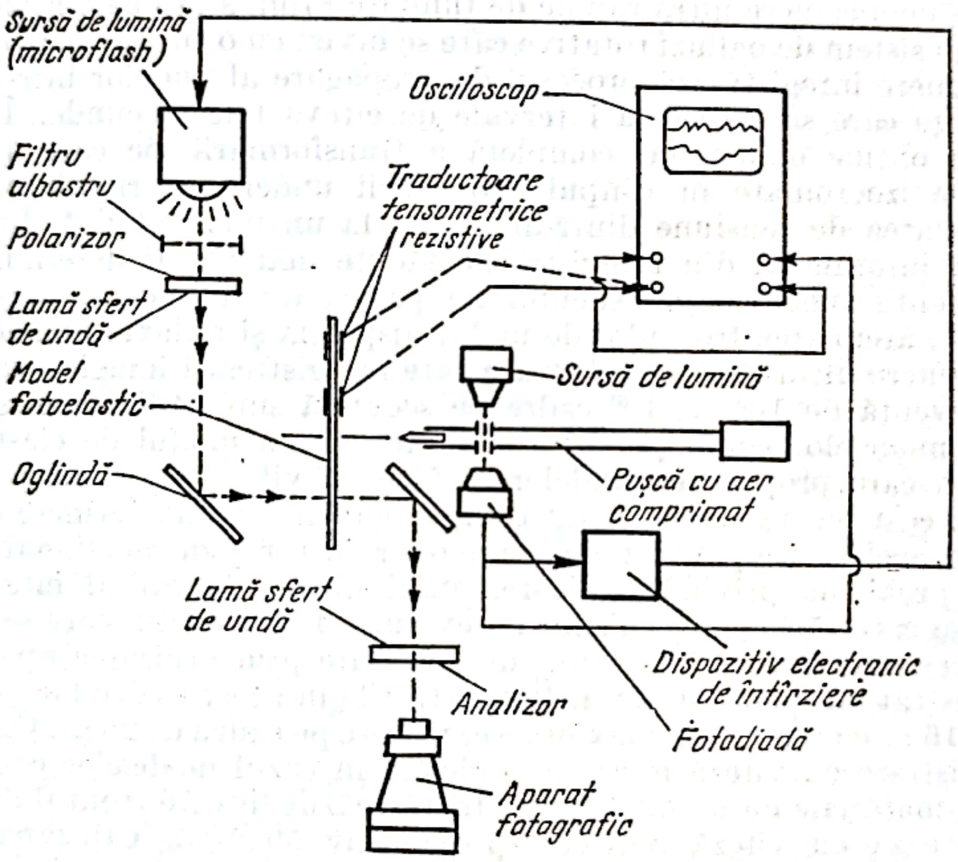


Fig. 4.92.

polariscop obişnuit cu lumină polarizată circular şi echipat cu un sistem de oglinzi tip periscop. Transformarea franjelor fotoelastice în timpul propagării undelor de tensiune a fost înregistrată cu un aparat de fotografiat pe un film de mare sensibilitate (1600 ASA). Pentru înregistrare în acest caz s-a folosit o sursă de lumină (micro flash) comandată de un dispozitiv electronic de întîrziere. Experimentările au fost făcute în condiţii de întuneric, aparatul fotografic rămînînd în permanenţă deschis. Evoluţia cîmpului de franje izocromate la diferite intervale de timp după aplicarea

Scanned with OKEN Scanner

impactului s-a putut înregistra prin repetarea experimentului în condiţii strict identice şi prin declanşarea sursei de lumină cu întîrzierea corespunzătoare.

Semnalele emise de traductoarele aplicate pe model au fost înregistrate pe un osciloscop cu mai multe canale. Declanşarea osciloscopului (pentru a înregistra răspunsul traductoarelor) cît şi a sursei de lumină, s-a făcut pe cale electrică. În acest scop un fascicul de lumină este trecut prin două orificii practicate în ţeava puştii şi proiectat pe o fotodiodă. La trecerea glontelui fasciculul este întrerupt şi semnalul de răspuns emis de fotodiodă declanşează cu întîrzierea necesară dată de dispozitivele electronice, sursa de lumină şi osciloscopul.

Evoluţia cîmpului de franje izocromate la diferite intervale de timp după impact mai poate fi înregistrată făcînd o singură încercare, prin utilizarea unei camere ultra rapide de filmat cu film staţionar. Fiind echipate cu un sistem de oglinzi rotative care se învîrt cu o turaţie foarte mare, aceste camere înregistrează procesul de propagare al undelor într-o suită de secvenţe care se suéced la intervale de cîteva microsecunde. În felul acesta se obţine o imagine completă a transformării pe care o suferă cîmpul de izocromate în timpul propagării undei, determinîndu-se cu precizie starea de tensiune dintr-un punct la un moment dat. În afară de aceste informaţii, din înregistrările făcute mai pot fi determinate şi alte elemente specifice procedeului de propagare a undelor în corpuri cum ar fi : atenuarea frontului de undă, dispersia şi reflexia undelor, etc. Aceste camere ultra-rapide de filmare care înregistrează imagini succesive cu o frecvenţă de $10^5 \ldots 10^6$ cadre pe secundă sînt utilizate în general în cazul modelelor confecţionate din materiale cu modul de elasticitate ridicat, în care propagarea undelor se face cu viteze mari. În afară de preţul de cost foarte ridicat acest echipament are şi o întreţinere costisitoare. În acelaşi timp utilizarea camerelor ultrarapide de filmat ridică serioase probleme privind realizarea unui nivel adecvat al intensităţii luminoase care să fie sincronizată cu evoluţia fenomenului care se urmăreşte. Aceste dificultăţi sînt mult minimalizate prin utilizarea aparatelor de înregistrat cu viteză scăzută. Înregistrările în acest caz se fac pe filme de 8 sau 16 mm cu un timp maxim de expunere pe cadru de 25 μs. Camerele de înregistrare cu viteză mică sînt folosite în cazul modelelor confecţionate din materiale cu modul de rezistenţă scăzut în care frontul de undă se deplasează cu viteză redusă (aproximativ 50 m/s). Utilizarea unor asemenea materiale cu proprietăţi vîscoelastice pronunţate implică o serie de greutăţi în confecţionarea şi manevrarea modelelor. Totodată comportarea acestor materiale este greu de corelat cu cea a materialelor inginereşti obişnuite, datorită unor mari diferenţe în privinţa proprietăţilor lor fizice.

În multe investigaţii fotoelastice în regim dinamic este necesar să se determine valorile individuale ale tensiunilor principale la un moment dat în diferite puncte din model. În acest scop, în practică, se obişnuieşte să se facă două serii de înregistrări (prin incidenţă normală şi prin incidenţă oblică) repetînd experimentul în condiţii strict identice. Uneori pentru a evita erorile date de repetabilitatea încercărilor, pentru obţinerea simultană a celor două serii de înregistrări (prin incidenţă normală şi oblică),

Scanned with OKEN Scanner

se foloseşte un polariscop de construcţie specială, cu două raze [15]. În principiu acest polariscop constă din două polariscoape ale căror axe optice se intersectează la 45° (fig. 4.93). Oglinzile au fost folosite astfel ca

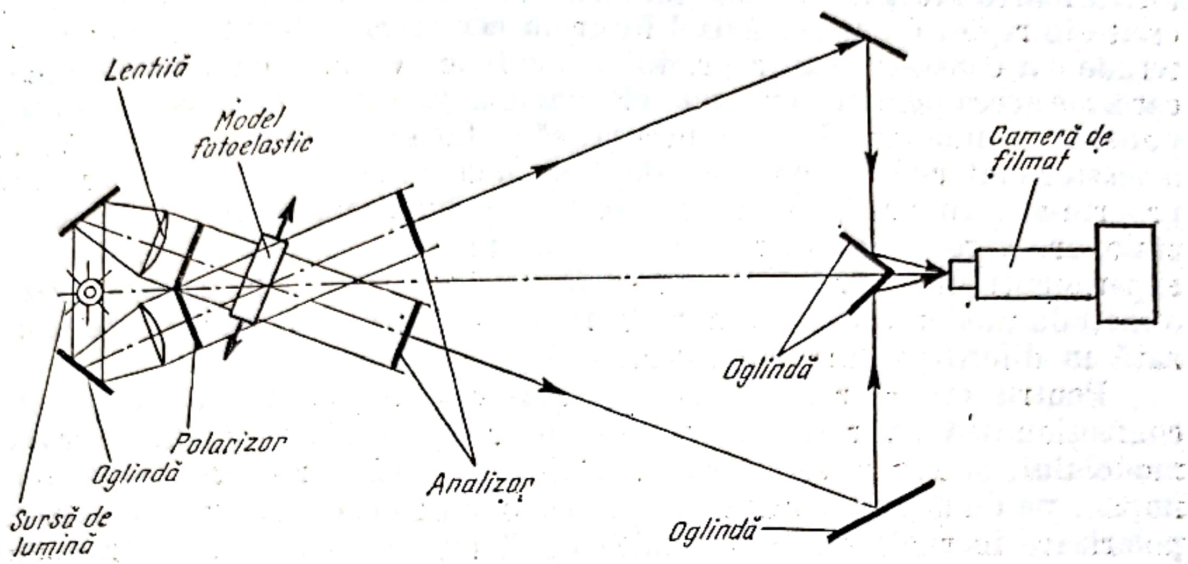


Fig. 4.93.

ambele raze de lumină să fie produse de aceeaşi sursă, iar înregistrarea să se facă cu o singură cameră de filmare.

4.11.4. STUDIUL PROPAGĂRII UNDELOR ÎN SPAŢIUL CU TREI DIMENSIUNI

În cercetările experimentale recente privind propagarea undelor de tensiune, investigaţiile fotoelastice pe modele spaţiale ocupă un loc important datorită posibilităţilor de cercetare pe care le oferă în comparaţie cu alte tehnici tensometrice. Fotoelasticitatea în regim dinamic pe modele spaţiale prezintă o serie de particularităţi care complică tehnica de lucru. Procedeul îngheţării tensiunilor nu mai poate fi utilizat şi de aceea în multe cercetări s-a folosit tehnica încorporării polariscopului în model, în secţiunea în care urmează să se studieze propagarea undelor elastice de tensiune.

Pentru a nu afecta procesul de propagare, foliile de polaroid încorporate în model trebuie să fie foarte subţiri şi să posede aceleaşi caracteristici elastice ca şi materialul modelului. În multe cercetări modelul fotoelastic tridimensional este mărginit de suprafeţe de revoluţie. În asemenea cazuri pentru înlăturarea efectelor produse de fenomenul de refracţie, modelul trebuie cufundat în timpul încercărilor într-un lichid cu indicele de refracţie apropiat de cel al materialului din care este confecţionat modelul fotoelastic. Imersiunea modelului fotoelastic în lichid în timpul încercărilor este legată de o serie de dificultăţi de amplasare a echipamentului de lucru. În afară de aceasta, în urma impactului, pe suprafaţa modelului se formează o serie de bule de aer care îngreunează înregistrarea franjelor izocromate [5]. Aceste neajunsuri au fost înlăturate într-o serie de experimentări recente [23] prin adoptarea unor noi procedee de lucru.

Scanned with OKEN Scanner

După cum s-a mai arătat, proprietăţile materialelor fotoelastice diferă foarte mult de cele ale materialelor obişnuite atunci cînd sînt solicitate în regim dinamic. Astfel în urma cercetărilor făcute pe aceste materiale s-a constatat că proprietăţile lor fizice variază cu viteza de încărcare. De aceea pentru o evaluare cît mai exactă a stării de tensiune dintr-un punct la un moment dat este necesar să se facă o etalonare cît mai precisă a acestor materiale, în condiţii identice cu cele în care se face experimentul propriu-zis. În practica experimentală se cunosc mai multe metode de etalonare care diferă între ele în anumite privinţe în funcţie de natura experimentului pentru care au fost făcute. În cele ce urmează se prezintă o metodă modernă de etalonare în regim dinamic [24] care poate fi utilizată în diferite tipuri de experimente.

Pentru etalonare, din acelaşi material fotoelastic cu modelul, se confecţionează o vergea cu secţiunea pătrată (cu latura egală cu grosimea modelului) şi lungimea de 400 ... 450 mm. În apropierea capătului de impact pe două feţe paralele se aplică două folii de polaroid cu axele de polarizare încrucişate. Pe celelalte două feţe se aplică două traductoare tensometrice în lungul barei care se leagă în punte în mod corespunzător, pentru a elimina efectul încovoierii. Pe aceleaşi feţe se mai aplică încă două traductoare în sens transversal, legate de asemenea în punte (fig. 4.94, a). La o distanţă de aproximativ 150 mm de această secţiune se mai aplică încă două traductoare în sens longitudinal. Răspunsurile tuturor traductoarelor sînt înregistrate simultan pe un osciloscop cu mai multe canale. Bara de etalonare pregătită în acest fel se fixează, de exemplu,

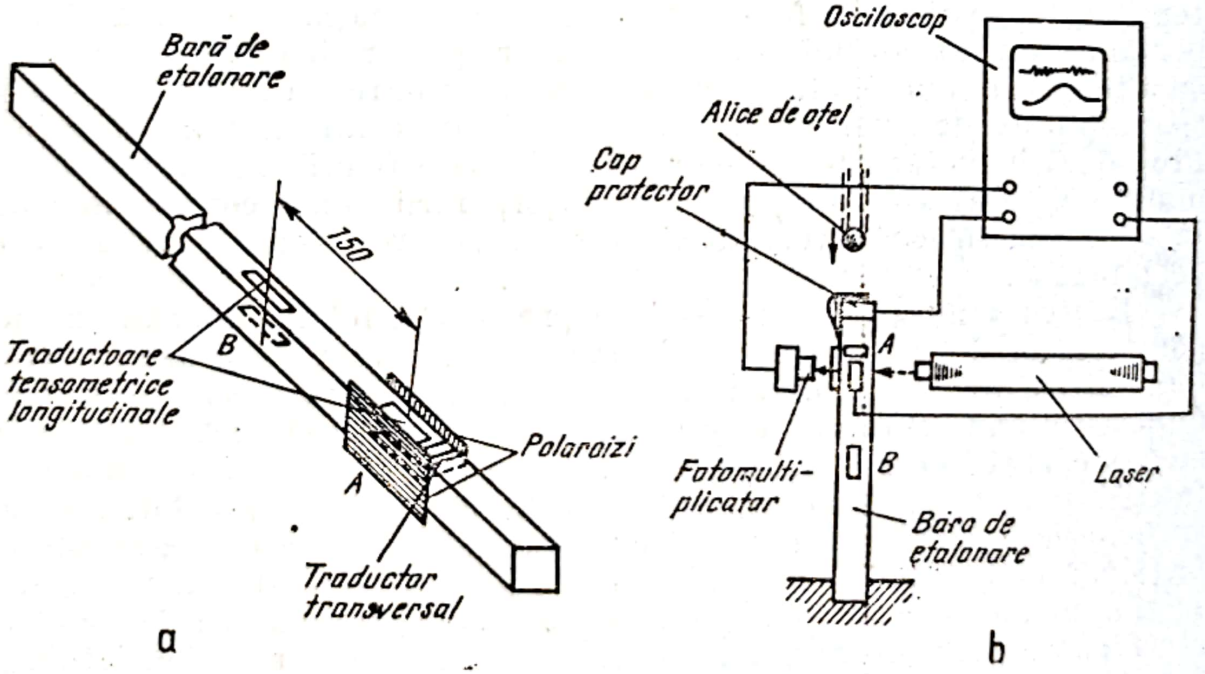
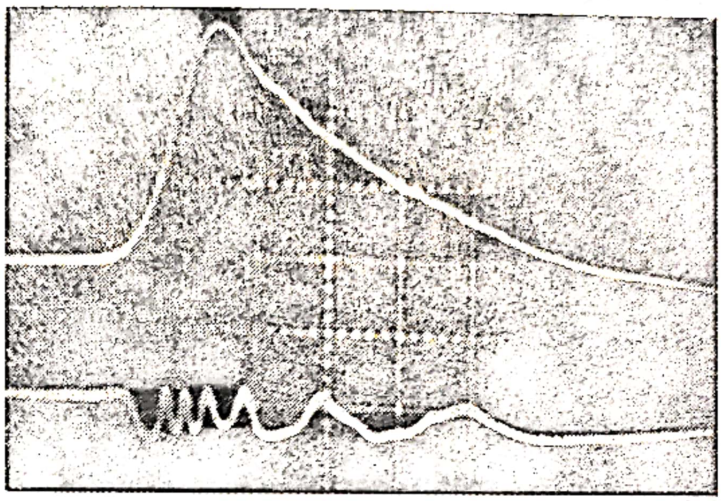


Fig. 4.94.

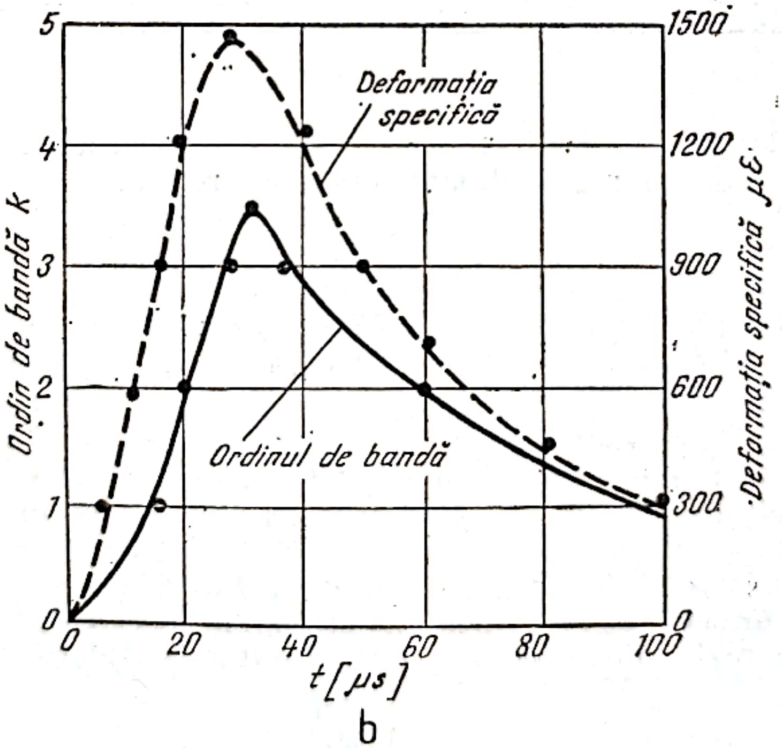
prin încastrare la un capăt (fig. 4.94, b). Prin secţiunea *A* în care au fost aplicate foliile polaroid se trece un fascicul laser care apoi se proiectează pe un tub fotomultiplicator. Răspunsul fotomultiplicatorului este de

Scanned with OKEN Scanner

asemenea înregistrat pe osciloscop simultan cu cel al traductoarelor din secţiunea *A*. Impactul poate fi realizat fie prin împuşcarea capătului liber al barei cu o alice de oţel expediată cu viteza corespunzătoare de o puşcă cu aer comprimat, fie prin căderea unei greutăţi pe acest capăt de la o înălţime determinată. Declanşarea sistemului electronic de înregistrare se face cu întîrzierea corespunzătoare dată de osciloscop, prin închiderea unui contact în momentul impactului. În fig. 4.95, a se prezintă



a



b

Fig. 4.95.

răspunsul fotomultiplicatorului (curba de sus) şi răspunsul traductoarelor din secţiunea *A* (curba de jos), înregistrate simultan pe osciloscop. Utilizînd aceste două înregistrări se poate trasa curba din fig. 4.95, b, din care

Scanned with OKEN Scanner

se determină apoi valoarea constantei fotoelastice a modelului în regim dinamic (σ_{0d}).

În fig. 4.96 a fost înregistrat răspunsul traductoarelor aplicate transversal în secțiunea A. Folosind și înregistrarea semnalelor emise de

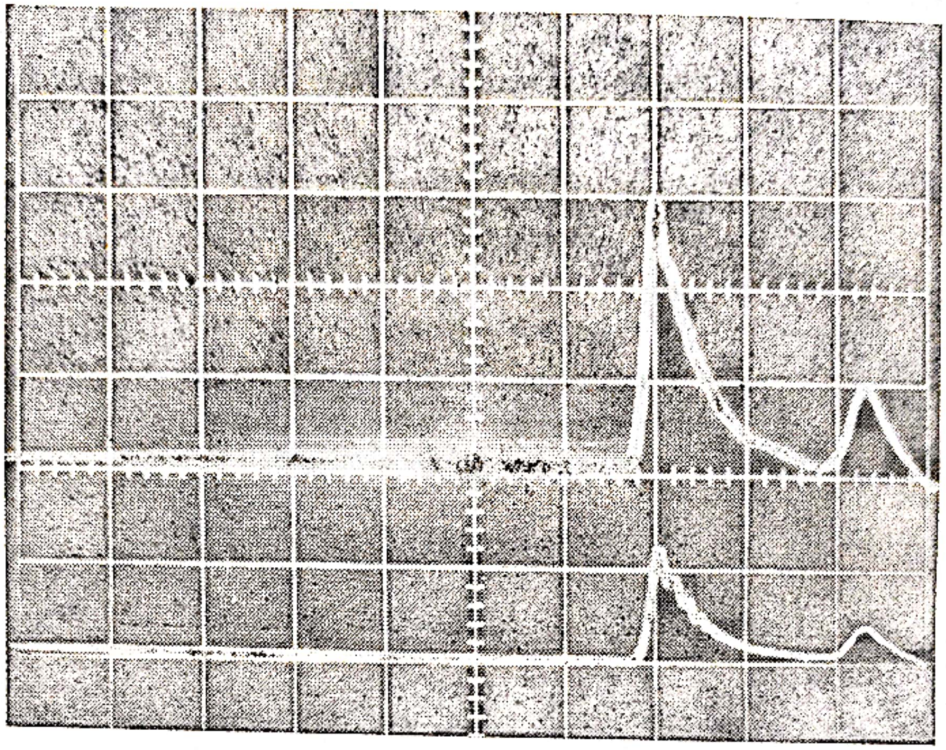


Fig. 4.96.

traductoarele longitudinale din aceeași secțiune se poate determina valoarea constantei Poisson în regim dinamic (μ_d) cu relația

$$\mu_d = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_t} \tag{4.154}$$

unde cu ε_l și ε_t au fost notate deformațiile înregistrate în sens longitudinal și transversal.

Înregistrînd succesiv pe aceeași diagramă primele impulsuri date de traductoarele montate în secțiunile A și B, se poate determina timpul în care unda a parcurs distanța AB și de aici viteza de propagare a undei longitudinale.

Cunoscînd viteza de propagare a undei longitudinale și densitatea materialului fotoelastice, se poate determina valoarea modulului de elasticitate în regim dinamic (E_d) din următoarea relație [28]

$$v = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}. \tag{4.155}$$

În felul acesta se determină datele necesare interpretării corecte a franjelor fotoelastice care traversează modelul fotoelastic.

Scanned with OKEN Scanner

Aplicație. Studiul propagării undelor de tensiune în barele de formă conică [24]. Propagarea undelor de tensiune în barele de formă conică face obiectul a numeroase cercetări experimentale în literatura de specialitate. În cele ce urmează se prezintă o investigație fotoelastică făcută pe modelul unei bare conice cu unghiul la vîrf de 20°, în scopul determinării distribuției tensiunilor principale într-o secțiune longitudinală, în timpul înaintării frontului de undă. Modelul fotoelastic al barei conice a fost turnat dintr-o rășină epoxidică (BAKELITE - ERL 2774) și apoi prelucrat pe strung. Forma modelului (de corp de revoluție) a impus adoptarea unor măsuri în vederea eliminării efectelor fenomenului de refracție. Dificultățile provocate de tehnica imersiunii au fost înlăturate în acest caz prin folosirea unui nou procedeu de lucru. Modelul a fost introdus într-un bloc de formă paralelipipedică confecționat din același material fotoelastic. Între cele două elemente (bloc - model) s-a prevăzut un joc de 0,1 mm în care a fost menținut un film de hallowax (lichid cu indicele de refracție apropiat de cel al materialului modelului). Pentru vizualizarea procesului de propagare a undelor de tensiune, în model a fost încorporat un polariscop plan. În urma secționării modelului cu două plane longitudinale, s-a izolat din zona centrală o lamă cu grosimea de 12 mm. În secțiunile făcute s-au introdus două folii polaroid HN - 32 cu grosimea de 05, mm. Datorită faptului că foliile nu conțin și lame sfert de undă, cele două elemente care alcătuiesc polariscopul au fost montate cu axele de polarizare perpendiculare între ele și orientate la 45° față de axa longitudinală a conului, obținîndu-se un polariscop plan cu cîmp întuneat. În felul acesta, peste cîmpul izocromatelor ar putea să se suprapună izoclina de 45°. Cum însă în cazul de față impactul se aplică axial, probabilitatea apariției acestei izocline și interferarea ei cu curbele izocromate este exclusă. Cele trei părți ale modelului avînd între ele lamele polaroid au fost lipite cu un adeziv special, iar modelul a fost rectificat. În fig. 4.97 se prezintă modelul fotoelastic al barei conice și blocul paralelipipedic înainte de montare.

Propagarea undelor de tensiune pe suprafața modelului a fost înregistrată pe cale tensometrică prin aplicarea unor traductoare rezistive în trei secțiuni ale lamei centrale. În fiecare

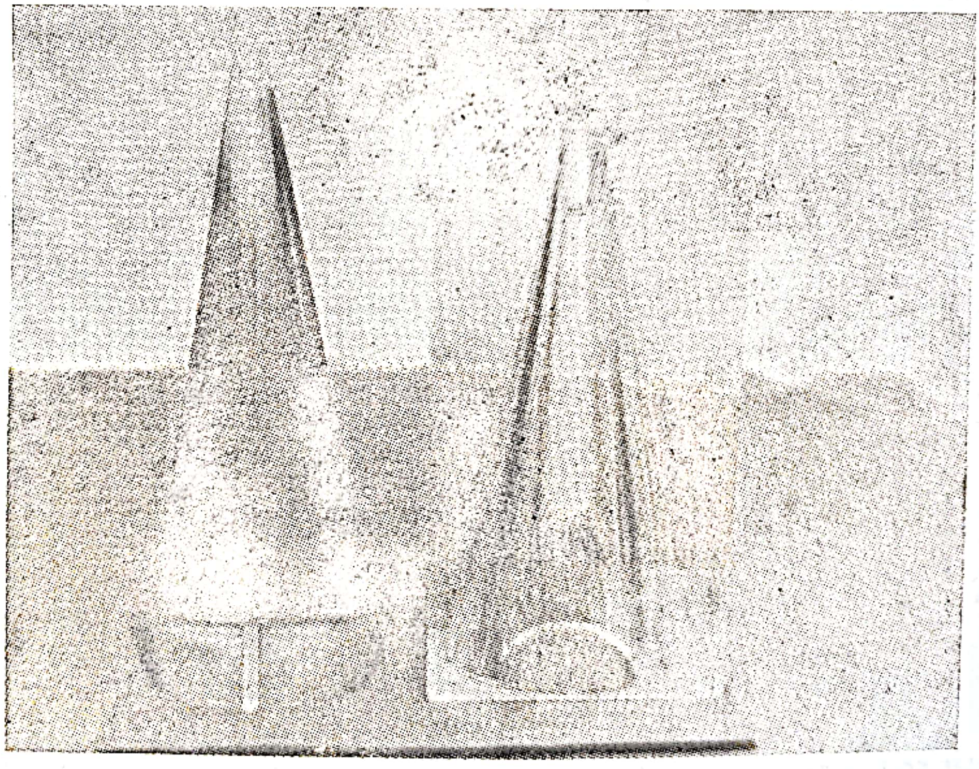


Fig. 4.97.

secțiune s-au aplicat cîte două traductoare, care s-au legat în serie pentru eliminarea efectului încovoierii. Traductoarele tensometrice au fost etalonate în prealabil în regim dinamic.

În vederea protejării modelului în timpul încercărilor, vîrful conului a fost secționat cu un plan perpendicular pe axă. Pe baza mică a trunchiului de con rezultat s-a aplicat un cap protector de formă cilindrică, din oțel, care s-a înlocuit după mai multe încercări.

Scanned with OKEN Scanner

Procesul propagării undelor de tensiune în model a fost înregistrat în două moduri (fig.4.98): prin filmare ultrarapidă şi prin inspectare în diferite puncte cu tehnica laser-fotomultiplicator. Filmarea ultrarapidă s-a făcut cu o cameră de tipul BOWEN-76 cu film staţionar, care a înregistrat evoluţia cimpului de tensiune pe 76 cadre succesive cu un timp de expunere pe cadru de 8,3 microsecunde. Viteza mare de înregistrare a camerei (12×10^4

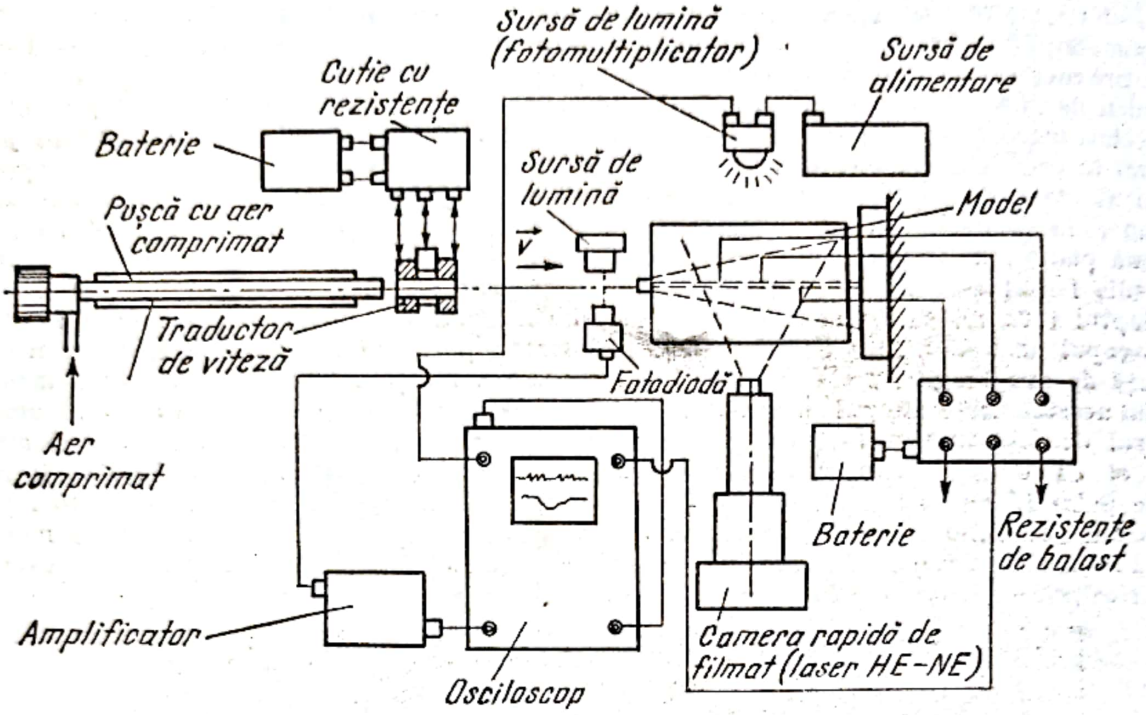


Fig. 4.98.

cadre/secundă), a impus folosirea unui film de mare sensibilitate (400 ASA) şi a unei surse foarte puternice de lumină. Comandarea sursei s-a făcut automat de la un osciloscop de înregistrare.

Tehnica laser - fotomultiplicator constă din inspectarea modelului fotoelastic în diferite puncte cu un fascicul laser care se proiectează la ieşirea din model pe un tub fotomultiplicator. În cazul de faţă s-a folosit un laser cu He-Ne de 15 mW, cu lungimea de undă de 6328 Å şi diametrul fasciculului de 1,1 mm. Fasciculul a fost proiectat pe un tub fotomultiplicator de tipul EMI 9558-OB. Răspunsul fotomultiplicatorului a fost înregistrat de fiecare dată pe un osciloscop, simultan cu cel dat de traductoarele tensometrice. Utilizarea acestei tehnici impune repetarea experimentului în condiţii strict identice.

Valorile individuale ale tensiunilor principale din secţiunea centrală a modelului au fost determinate folosind metoda incidenţei oblice. Astfel, înregistrările au fost făcute mai întîi prin incidenţă normală şi apoi prin incidenţă oblică la 65°, urmărindu-se de fiecare dată asigurarea unei bune repetabilităţi a experimentului.

Impactul axial a fost aplicat pe baza mică a trunchiului de con, prin împuşcare cu o alice de oţel proiectată cu viteza de 29,2 m/s, de o puşcă cu aer comprimat. Condiţiile în care s-a repetat de fiecare dată experimentul au fost urmărite atît prin înregistrarea vitezei alicei de oţel cu ajutorul unui traductor de viteză (fig. 4.98), cît şi prin examinarea înregistrărilor tensometrice.

Întregul sistem de înregistrare a fost comandat prin semnalul emis de o fotodiodă pe care s-a proiectat un fascicul de lumină. La trecerea alicei de oţel prin dreptul fasciculului luminos (fig. 4.98), acesta s-a întrerupt pentru o fracţiune de timp, făcînd ca dioda să emită un semnal. Acest semnal a fost introdus într-un osciloscop de tip TEKTRONIX-565, unde s-a întîrziat în mod corespunzător pentru a declanşa întregul sistem de înregistrare în momentul cînd frontul undei de tensiune ajunge în zona aflată sub observare.

În fig. 4.99 se prezintă o suită de cadre din înregistrările făcute cu camera ultrarapidă de filmat. Forma franjelor izocromate din aceste secvenţe arată că frontul de undă este sferic, confirmînd ipotezele care stau la baza metodei aproximative de calcul a lui Landon şi

Scanned with OKEN Scanner

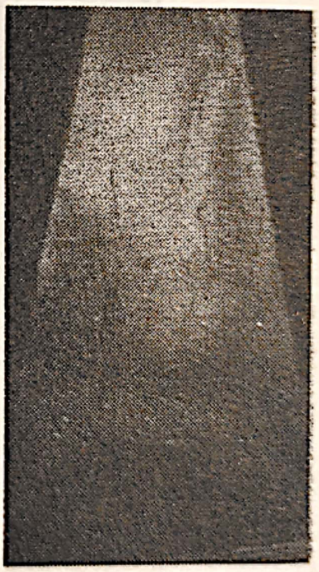
93 μs

176 μs

159 μs

168 μs

176 μs



185 μs

Fig. 4.99.

Scanned with OKEN Scanner

Quinney [30]. În figura 4.100 se prezintă una din înregistrările făcute cu tehnica laser-fotomultiplicator, prin incidență normală. Curba superioară reprezintă răspunsul fotomultiplicatorului, iar cea inferioară răspunsul traductoarelor aplicate în secțiunea respectivă.

În urma prelucrării înregistrărilor făcute [25], au fost determinate valorile individuale ale tensiunilor principale din cele trei secțiuni, aflate în planul lamei centrale (fig. 4.101).

Din examinarea curbelor prezentate în fig. 4.101, rezultă că tensiunile principale nu sînt distribuite uniform în secțiunea conului așa cum admite teoria aproximativă a lui Landon

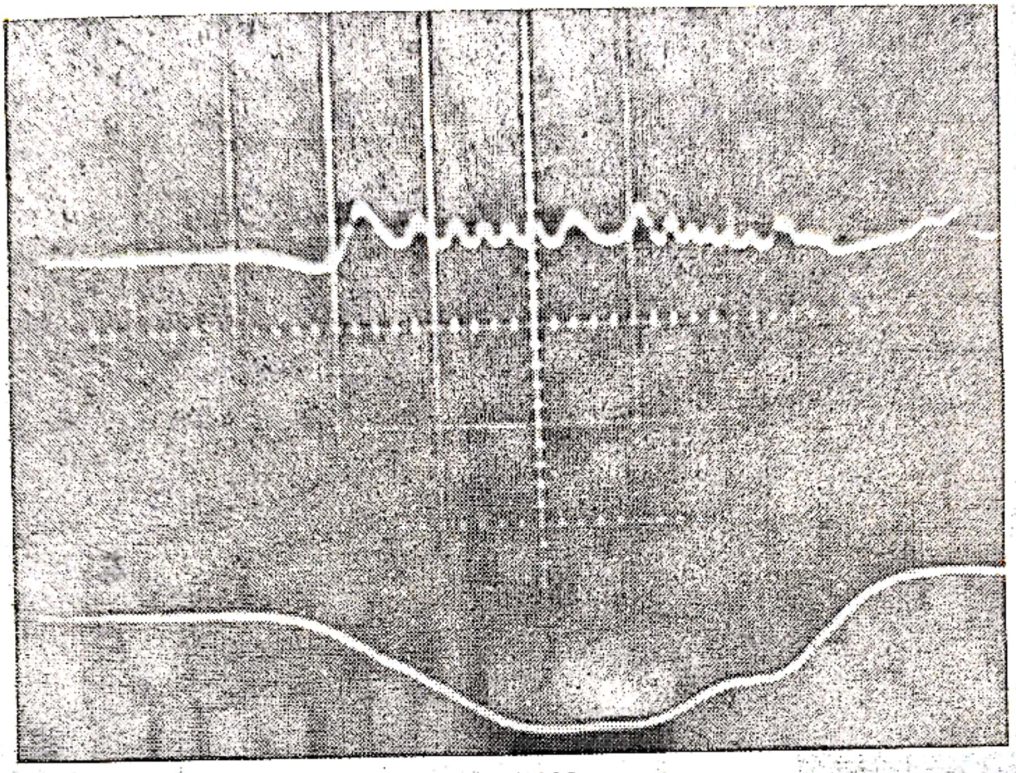


Fig. 4.100.

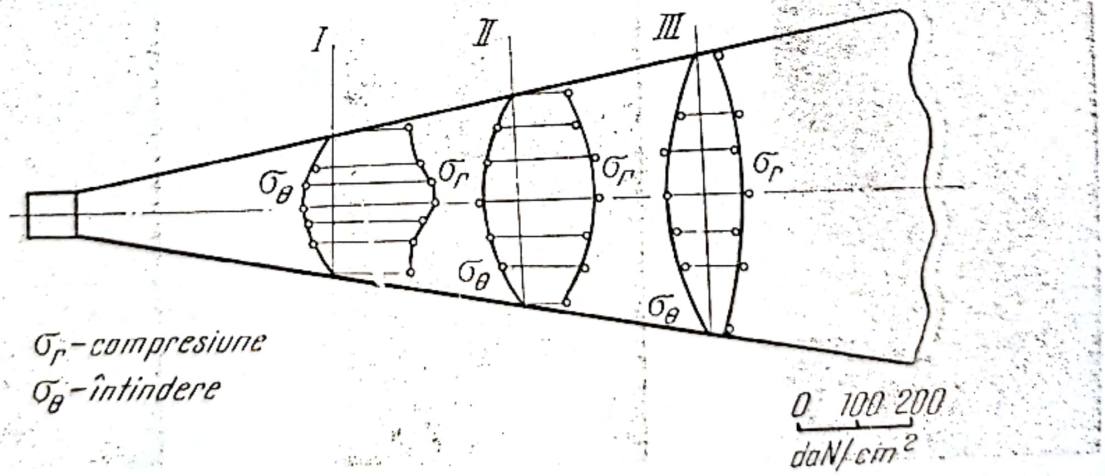


Fig. 4.101.

și Quinney [30]. De asemenea așa după cum se poate observa și în această figură, impulsul inițial suferă o puternică atenuare pe măsura avansării undei către baza mare a trunchiului de con. Astfel, din prelucrarea datelor a rezultat o atenuare a frontului de undă de 28,5% pe o lungime de 100 mm la interior și de 35,5% pe aceeași lungime la suprafață, punîndu-se în evidență efectul multiplelor reflexii de la suprafața conului.

Înregistrările făcute au mai scos de asemenea în evidență existența unor unde de tensiune sub forma unor trene negative rezultate în urma numeroaselor reflexii.

Scanned with OKEN Scanner

4.12. LACURI FOTOELASTICE

Lacurile fotoelastice au fost folosite pentru prima oară la determinarea stării de tensiune pe suprafaţa corpurilor, în anul 1930 de către Mesnager [6]. Datorită unor dificultăţi de lucru, această tehnică experimentală a avut la început o utilizare restrînsă. Începînd din anul 1960 metoda s-a îmbunătăţit continuu fiind folosită în prezent de foarte mulţi cercetători atît în cercetările de laborator, cît şi într-o serie de cercetări cu caracter industrial.

Metoda constă în aplicarea unei pelicule foarte subţiri dintr-un material fotoelastic pe suprafaţa piesei de studiat, care în prealabil a fost tratată cu o vopsea reflectorizantă în zona respectivă. Prin încărcare piesa se deformează şi odată cu aceasta se deformează şi pelicula subţire din material birefringent aplicată la suprafaţă. Efectul fotoelastic poate fi observat cu ajutorul unui polariscop special cu reflexie, care permite determinarea diferenţei tensiunilor principale pe o zonă întinsă de pe suprafaţa piesei.

În practica experimentală se întîlnesc diverse tipuri constructive de polariscoape cu reflexie. Sistemele optice folosite în construcţia acestor polariscoape sînt prezentate în figura 4.102, a şi b. Sistemul optic din fig. 4.102, a se foloseşte în general pentru studii pe modele convenţionale la care ordinele de bandă înregistrate sînt scăzute. Deoarece lumina traversează de două ori stratul birefringent, efectul fotoelastic observat va fi dublu. Acest tip de polariscop poate fi uşor construit prin adaptarea unui polariscop obişnuit. Domeniul de folosire este însă limitat datorită faptului că aparatul nu este portabil şi că semioglinda introduce o serie de neliniarităţi în compensare prin fenomenul de reflexie. Sistemul optic din fig. 4.102, b este cel mai întîlnit în construcţia polariscoapelor portabile. Uneori aceste polariscoape sînt echipate cu dispozitive speciale de înregistrare în regim dinamic.

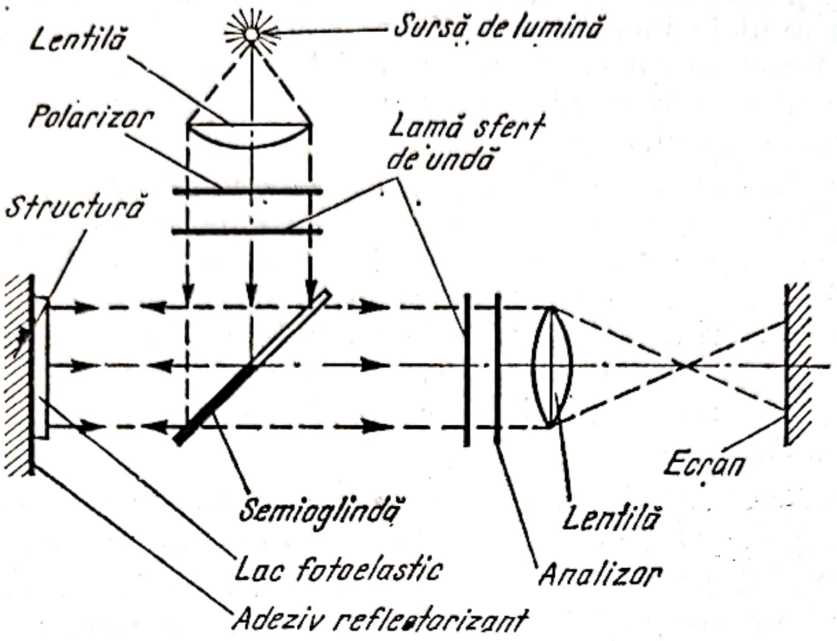
4.12.1. PROCEDEE DE APLICARE A LACURILOR FOTOELASTICE

În funcţie de mărimea deformaţiilor de la suprafaţa pieselor şi de forma acestora, în practică se folosesc trei procedee de aplicare a lacurilor fotoelastice.

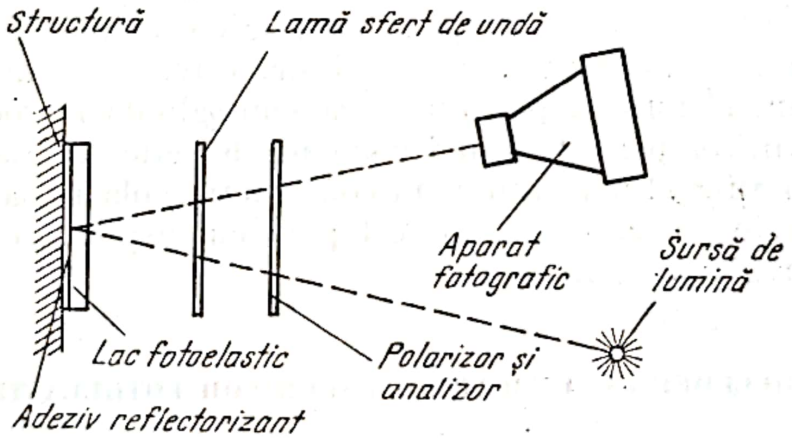
a) Pentru studiile pe corpuri metalice în care intervin deformaţii mari (investigaţiile pe piese deformate plastic), lacul se aplică direct pe suprafaţa piesei. În acest caz, suprafaţa trebuie mai întîi lustruită şi apoi degresată cu acetonă sau alcool. După degresare, piesa se încălzeşte uniform la 50 ... 100°C şi se aplică lacul. Tensiunea superficială a lacului va permite obţinerea unui strat birefringent cu grosimea cuprinsă între 0,25 şi 0,5 mm, fără ca lacul să curgă de pe piesă. Pentru obţinerea unor grosimi mai mari se repetă de mai multe ori procesul menţionat mai sus.

Scanned with OKEN Scanner

b) În cazul cînd deformaţiile nu sînt prea mari (mai mici de 3%), pe suprafeţele plane ale corpului se aplică cu un adeziv reflectorizant, folii subţiri de material birefringent. Uneori la piesele confecţionate din materiale cum este oţelul, se poate renunţa la utilizarea adezivilor reflectori-



a



b

Fig. 4.102.

zanţi, cu condiţia ca zonele cercetate să fie foarte bine polizate. Pentru obţinerea unor rezultate bune este necesar chiar şi în aceste situaţii să se utilizeze adezivii reflectorizanţi care oferă condiţii de reflexie mult mai bune decît sprafeţele metalice lustruite.

c) Pentru acoperirea cu lacuri fotoelastice a structurilor cu suprafeţe curbe, se toarnă mai întîi pe o sticlă plană pelicule din material fotoelastic cu grosimea dorită. În stare semipolimerizată, pelicula se desprinde de pe sticlă şi se aplică pe structură, urmărindu-se profilul acesteia. Este

Scanned with OKEN Scanner

indicat ca atît pe piesa care urmează să fie acoperită cu lac fotoelastic cît şi pe mîinile celui care execută acoperirea să se găsească o peliculă subţire de ulei mineral, cum este parafina lichidă. După cîteva ore de la aplicare, procesul de polimerizare este încheiat şi lacul se întăreşte. Cochilia formată se desprinde de pe suprafaţa piesei, se degresează foarte bine ambele suprafeţe (ale piesei şi cochiliei) cu acetonă sau alcool, după care cochilia se fixează definitiv prin lipire cu adeziv reflectorizant.

4.12.2. DETERMINAREA TENSIUNILOR PE SUPRAFAŢA STRUCTURILOR

Cînd structura este încărcată, deformaţiile de la suprafaţă se transmit şi învelişului fotoelastic care devine birefringent. Efectul fotoelastic introdus poate fi vizualizat şi înregistrat cu ajutorul unui polariscop cu

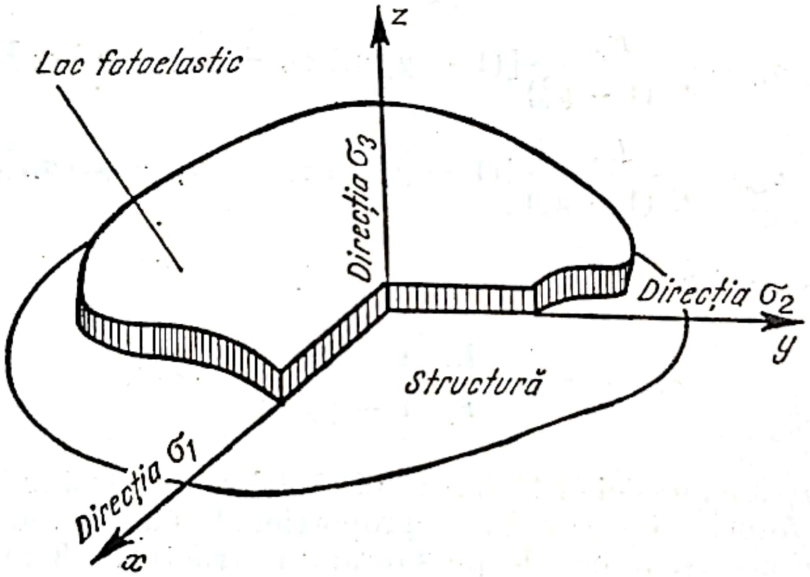


Fig. 4.103.

reflexie. În cele ce urmează se va considera că pelicula de lac fotoelastic aderă foarte bine la suprafaţa piesei şi că grosimea acesteia este suficient de mică şi constantă. Cu ceste ipoteze, potrivit fig. 4.103, se poate scrie

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \sigma_z = 0 \\ \varepsilon_{1p}(x, y) &= \varepsilon_{1s}(x, y) \\ \varepsilon_{2p}(x, y) &= \varepsilon_{2s}(x, y) \end{aligned} \tag{4.156}$$

unde cu ε_p şi ε_s au fost notate deformaţiile în pelicula de lac fotoelastic şi în structură. În cazul stării plane de tensiune aceste deformaţii sînt date de

următoarele expresii

$$\varepsilon_{1p} = \frac{1}{E_p}(\sigma_{1p} - \mu_p\,\sigma_{2p})$$

$$\varepsilon_{2p} = \frac{1}{E_p}(\sigma_{2p} - \mu_p\,\sigma_{1p})$$

$$\varepsilon_{1s} = \frac{1}{E_s}(\sigma_{1s} - \mu_s\,\sigma_{2s}) \tag{4.157}$$

$$\varepsilon_{2s} = \frac{1}{E_s}(\sigma_{2s} - \mu_s\,\sigma_{1s}).$$

Înlocuind expresiile (4.157) în ultimele două relații (4.156) și rezolvînd sistemul în funcție de σ_{1p} și σ_{2p}, se obține

$$\sigma_{1p} = \frac{E_p}{E_s(1-\mu_p^2)}[(1 - \mu_p\,\mu_s)\,\sigma_{1s} + (\mu_p - \mu_s)\,\sigma_{2s}]$$

$$\sigma_{2p} = \frac{E_p}{E_s(1-\mu_p^2)}[(1 - \mu_p\,\mu_s)\,\sigma_{2s} + (\mu_p - \mu_s)\,\sigma_{1s}]. \tag{4.158}$$

Scăzînd cele două relații (4.158), rezultă

$$\sigma_{1p} - \sigma_{2p} = \frac{E_p}{E_s}\cdot\frac{1+\mu_s}{1-\mu_p}(\sigma_{1s} - \sigma_{2s}). \tag{4.159}$$

Din examinarea expresiei (4.159) rezultă că diferența tensiunilor principale din pelicula fotoelastică este direct proporțională cu diferența tensiunilor principale în același punct de pe suprafața structurii. Ținînd seama de (4.45) și (4.46) cum și de faptul că lumina traversează de două ori pelicula fotoelastică, se poate scrie

$$\sigma_{1p} - \sigma_{2p} = \frac{k\,\sigma_0'}{2h} = \frac{E_p}{E_s}\cdot\frac{1+\mu_s}{1+\mu_p}(\sigma_{1s} - \sigma_{2s}).$$

Din ultima egalitate rezultă

$$\sigma_{1s} - \sigma_{2s} = \frac{E_s}{E_p}\cdot\frac{1+\mu_p}{1+\mu_s}\cdot\frac{k\,\sigma_0'}{2h}. \tag{4.160}$$

Prin urmare diferența tensiunilor principale $(\sigma_{1s} - \sigma_{2s})$ într-un punct de pe suprafața structurii poate fi determinată înregistrînd ordinul de bandă fotoelastică, în punctul respectiv și bineînțeles cunoscînd constantele elastice E_s, E_p, μ_p, μ_s și grosimea h a peliculei.

Scanned with OKEN Scanner

4.12.3. SENSIBILITATEA LACURILOR FOTOELASTICE

Sensibilitatea sau răspunsul lacurilor fotoelastice reprezintă numărul de franje izocromate care corespund la o diferență a tensiunilor principale de 1 daN/cm² pe suprafața structurii

$$S_p = \frac{k}{\sigma_{1s} - \sigma_{2s}} = \frac{2h}{\sigma_0'} \cdot \frac{E_p}{E_s} \cdot \frac{1 + \mu_s}{1 + \mu_p}. \tag{4.161}$$

Din expresia (4.161) rezultă că sensibilitatea lacurilor fotoelastice crește direct proporțional cu grosimea peliculei. După cum se va arăta, creșterea grosimii produce un efect de întărire care distorsionează starea de tensiune din stratul de lac. Constantele lacului de care depinde sensibilitatea pot fi grupate într-o singură constantă de sensibilitate Q_p

$$Q_p = \frac{E_p}{1 + \mu_p} \cdot \frac{1}{\sigma_0'}.$$

Constanta Q_p, indică sensibilitatea lacului fotoelastic. De regulă această constantă este indicată de firma producătoare odată cu celelalte constante care caracterizează proprietățile fizice ale unui anumit tip de lac fotoelastic.

Trebuie arătat, însă, că răspunsul lacurilor fotoelastice este limitat, ceea ce face ca această tehnică să nu fie potrivită pentru determinarea cu precizie a cîmpurilor de tensiune caracterizate prin valori mici ale lui $(\sigma_{1s} - \sigma_{2s})$. Precizia determinărilor făcute cu tehnica lacurilor fotoelastice poate fi îmbunătățită prin utilizarea metodelor de compensare pentru evaluarea cît mai exactă a ordinului de bandă dintr-un punct. Astfel, evaluarea ordinului de bandă dintr-un punct cu precizie de $\pm$ 0,01 franje permite determinarea unor valori ale lui $(\sigma_{1s} - \sigma_{2s})$ de $\pm$ 20 daN/cm². Desigur că utilizarea compensării reduce analiza fotoelastică la o analiză discretă prin puncte. Sensibilitatea lacurilor fotoelastice poate fi îmbunătățită și prin utilizarea metodelor de multiplicare a ordinului de bandă.

4.12.4. EFECTUL DE ÎNTĂRIRE

Dacă o structură pe care a fost aplicat un lac fotoelastic se încarcă, pelicula birefringentă preia o parte din încărcare, făcînd astfel ca deformația din zona respectivă să fie mai mică decît cea reală. Această micșorare a deformației locale este cunoscută în literatura de specialitate sub denumirea de efect de întărire. În multe cazuri de solicitare este posibil să se calculeze efectul de întărire produs de un anumit tip de lac fotoelastic și să se determine un factor de corecție cu care se amendează datele înregistrate pentru obținerea adevăratelor valori care caracterizează cîmpul de tensiune.

Pentru calculul factorului de corecție, din structura acoperită cu lac fotoelastic se izolează un element de volum ca în fig. 4.104, a. Se mai consideră un element de volum asemănător din structură în cazul cînd

Scanned with OKEN Scanner

aceasta nu este acoperită cu lac (fig. 4.104, b). Scriind proiecţiile forţelor care acţionează în lungul axei Ox, în ambele cazuri şi punînd condiţia să fie egale, rezultă

$$h_s\, dy\, \sigma_{x_r} = h_s\, dy\, \sigma_{x_s} + h_p\, dy\, \sigma_{x_p}$$

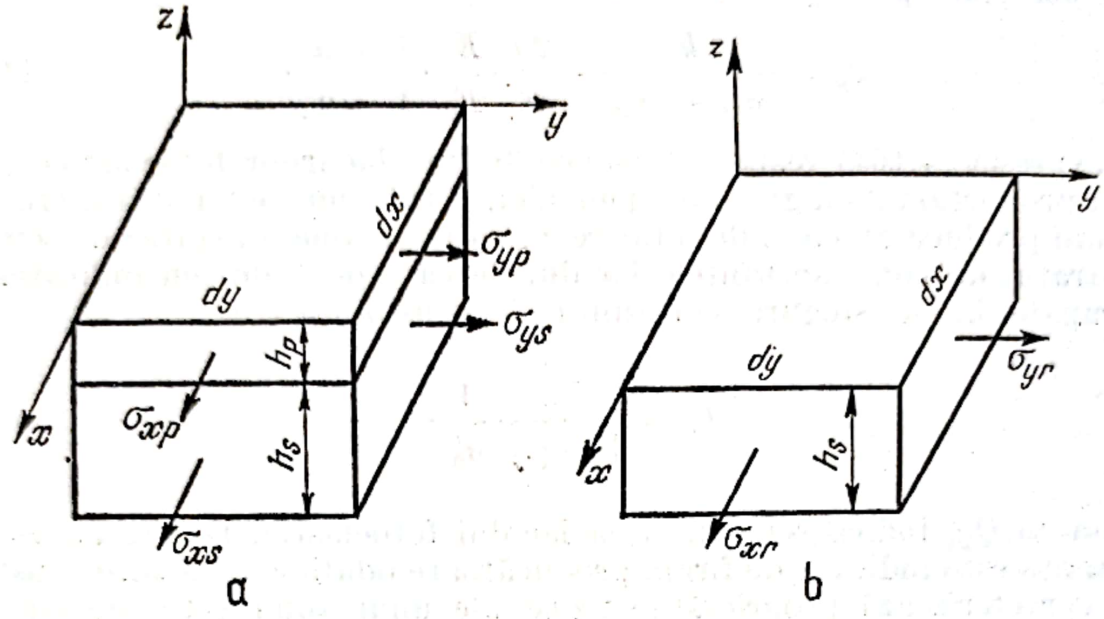


Fig. 4.104.

de unde

$$\sigma_{x_r} = \sigma_{x_s} + \frac{h_p}{h_s}\, \sigma_{x_p}. \tag{4.162}$$

Procedînd asemănător şi pe direcţia axei Oy, se obţine

$$\sigma_{y_r} = \sigma_{y_s} + \frac{h_p}{h_s}\, \sigma_{y_p} \tag{4.163}$$

unde σ_{x_r} şi σ_{y_r} reprezintă valorile reale ale tensiunilor pe direcţiile Ox şi Oy.

Considerăm din nou că

$$\varepsilon_{x_p} = \varepsilon_{x_s}$$

$$\varepsilon_{y_p} = \varepsilon_{y_s}$$

$$\varepsilon_{z_p} = \varepsilon_{z_s} = 0.$$

Atît lacul cît şi structura fiind supuse unei stări plane de solicitare se poate scrie (vezi § 1.4.2)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x). \tag{4.164}$$

Scanned with OKEN Scanner

Înlocuind (4.164) în relaţiile (4.162) şi (4.163) şi scăzîndu-le, după unele simplificări rezultă

$$\varepsilon_{x_r} - \varepsilon_{y_r} = \left(1 + \frac{h_p}{h_s} \cdot \frac{E_p}{E_s} \frac{1+\mu_s}{1+\mu_p}\right) \cdot (\varepsilon_{x_p} - \varepsilon_{y_p}) \cdot \qquad (4.165)$$

Această ecuaţie mai poate fi scrisă

$$\varepsilon_{x_r} - \varepsilon_{y_r} = F_c\,(\varepsilon_{x_p} - \varepsilon_{y_p}) \qquad (4.166)$$

unde

$$F_c = 1 + \frac{h_p}{h_s} \cdot \frac{E_p}{E_s} \cdot \frac{1+\mu_s}{1+\mu_p} \qquad (4.167)$$

reprezintă factorul de corecţie care trebuie folosit pentru obţinerea valorilor reale ale deformaţiilor.

În fig. 4.105 se prezintă variaţia factorului de corecţie cu raportul h_p/h_s, pentru diferite materiale în cazul stării plane de tensiune [6]. Valorile factorului de corecţie corespund unui lac folosit curent în tehnica lacurilor fotoelastice care are $E = 2{,}94 \cdot 10^4$ daN/cm² şi $\mu = 0{,}36$. Valorile facto-

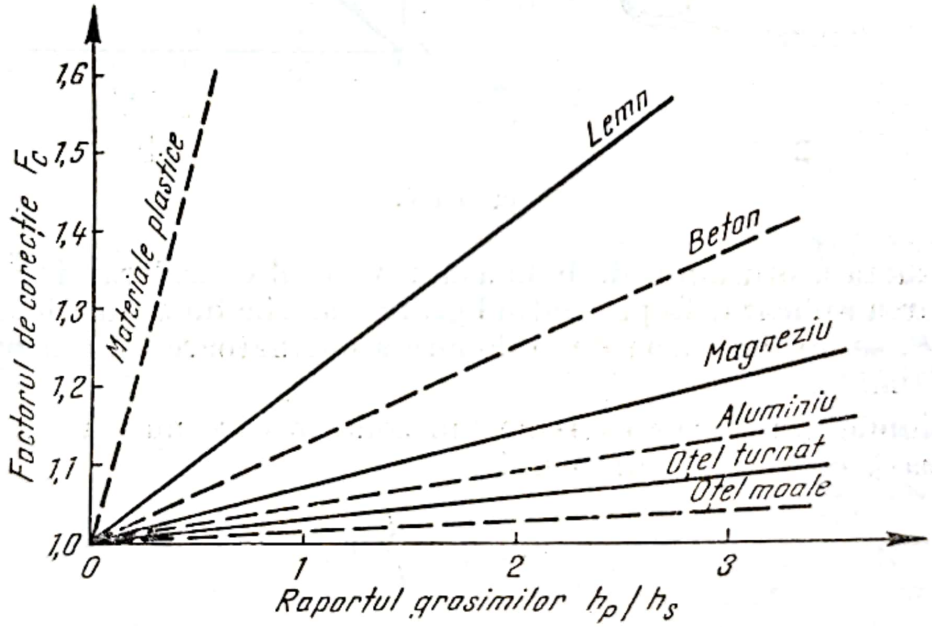


Fig. 4.105.

rului de corecţie pentru alte tipuri de solicitări, sînt indicate în literatura de specialitate [6], [19], sau de firma producătoare, sub formă de curbe, în funcţie de tipul lacului.

4.12.5. ETALONAREA LACURILOR FOTOELASTICE

Pentru etalonarea unui lac fotoelastic se utilizează o bară dintr-un aliaj de aluminiu cu lungimea de 300 mm şi secţiunea dreptunghiulară 25 × 5 mm². Într-o secţiune a barei se aplică o peliculă de lac fotoelastic

Scanned with OKEN Scanner

de grosime măsurată h_p. Bara se încastrează la un capăt, iar la celălalt se încarcă cu greutăţi (fig. 4.106, a). Zona în care a fost aplicată pelicula fotoelastică, avînd marcat în partea centrală un punct, este observată printr-un polariscop cu reflexie cu cîmp întunecat. Bara se încarcă treptat determinîndu-se printr-unul din procedeele de compensare (Tardy) valoarea

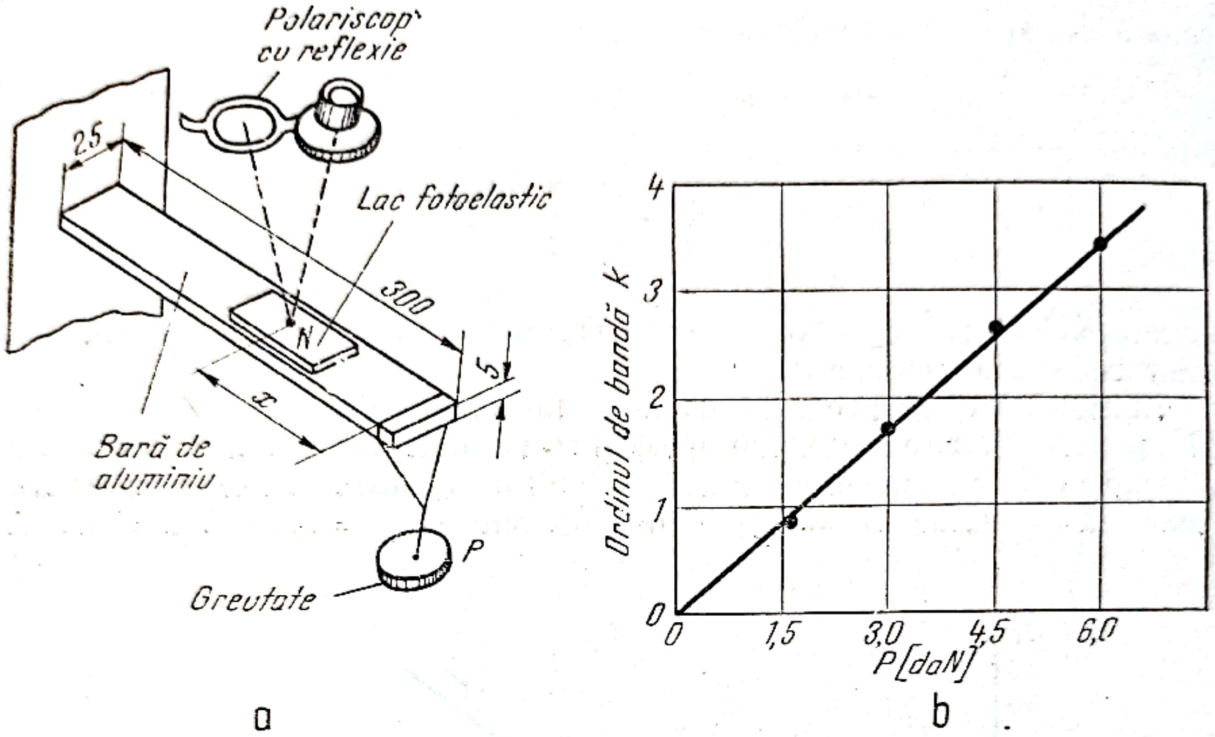


Fig. 4.106.

cît mai exactă a ordinului de bandă din punctul considerat în funcţie de de încărcarea aplicată. Reprezentînd grafic valorile lui k funcţie de sarcina aplicată P, se obţine curba de etalonare asemănătoare cu cea prezentată în fig. 4.106, b.

Tensiunile din fibrele extreme din zona în care nu s-a aplicat lacul se calculează cu relaţia cunoscută

$$\sigma_{1calc} = \frac{M}{I_z} y, \tag{4.168}$$

Dacă în expresiile (4.164) indicii x şi y se înlocuiesc cu 1 şi 2 şi se scad, se obţine

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \frac{E_s}{1 + \mu_s}. \tag{4.169}$$

Deoarece în cazul de faţă $\sigma_{2s} = 0$, rezultă

$$\sigma_{1\ măsur} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_{măsur} \cdot \frac{E_s}{1 + \mu_s}. \tag{4.170}$$

Scanned with OKEN Scanner

Dar potrivit (4.49),

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_{măsur} = k\varepsilon_0.$$

Dacă lacul etalonat urmează să fie folosit în cazul unei stări plane de tensiune, sau pentru altă solicitare, iar etalonarea s-a făcut la încovoiere, trebuie să se introducă factorul de corecţie. Dacă lacul a fost etalonat la încovoiere şi urmează să fie folosit tot într-o problemă de încovoiere, corecţia nu se mai face.

Pentru cazul în care este necesar să se facă corectarea datelor, ţinînd seama de (4.166) expresia (4.49) devine

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_{real} = F_c\,(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_{măsur} = k\varepsilon_0 \tag{4.171}$$

Înlocuind $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_{măsur}$ din (4.171) în (4.170) rezultă

$$\sigma_{1real} = \frac{k\varepsilon_0}{F_c} \cdot \frac{E_s}{1+\mu_s}. \tag{4.172}$$

Din egalarea (4.172) cu (4.168) se obţine

$$\varepsilon_0 = \frac{1+\mu_s}{E_s} \cdot \frac{F_c}{k} \cdot \frac{M}{I_z}\, y. \tag{4.173}$$

4.13. MATERIALE FOLOSITE PENTRU CONFECŢIONAREA MODELELOR FOTOELASTICE

O problemă de mare importanţă în investigaţiile fotoelastice o constituie alegerea materialului pentru confecţionarea modelelor. Din păcate, pînă în prezent nu poate fi vorba de o uzină specializată în producerea unor materiale plastice speciale, cu proprietăţi de birefringenţă, destinate în exclusivitate pentru cercetări fotoelastice. Consumul materialelor plastice birefringente în cercetările de fotoelasticitate fiind foarte redus, aceste materiale rezultă ca produse secundare ale marilor uzine producătoare de materiale plastice destinate industriei electrotehnice sau altor ramuri industriale. De aceea, de multe ori cercetătorii sînt obligaţi să-şi aleagă materialul cel mai potrivit din materialele existente pe piaţă care au fost fabricate pentru alte întrebuinţări decît pentru fotoelasticitate. Acest lucru impune cunoaşterea calităţilor pe care trebuie să le posede un material fotoelastic. În general, un material pentru a fi utilizat la confecţionarea modelelor fotoelastice trebuie să aibă următoarele calităţi :

— să fie suficient de transparent în lumina obişnuită ;

— să aibă o sensibilitate ridicată. În felul acesta se obţine un număr suficient de franje la o încărcare relativ redusă, evitîndu-se astfel încăr-

carea cu sarcini mari care de multe ori distorsionează cîmpul de franje izocromate. O măsură a sensibilității materialelor fotoelastice este constanta de sensibilitate;

— materialele fotoelastice trebuie să păstreze caracteristici liniare în:

a) relația dintre tensiuni și deformații

b) relația dintre tensiune și ordinul de bandă

c) relația dintre deformație și ordinul de bandă

— materialul trebuie să prezinte izotropie optică și mecanică;

— fenomenul de curgere la materialele fotoelastice trebuie să fie redus;

— să posede valori ridicate ale modulului de elasticitate și limitei de curgere;

— sensibilitatea materialelor fotoelastice să nu varieze cu temperatura;

— să se prelucreze cu ușurință pe mașini unelte;

— să fie lipsite de eforturi remanente;

— să aibă un preț de cost redus.

În cele ce urmează se prezintă cîteva din materialele fotoelastice întîlnite mai des în comerț. Proprietățile fizice ale acestora sînt date în tabelul 4.5.

Sticla. Se folosește destul de rar ca material fotoelastic datorită birefringenței și rezistenței scăzute pe care o prezintă. Cu toate acestea, în ultimii ani a fost preluată din nou ideea de a folosi sticla ca material fotoelastic în anumite studii sau sub diferite forme de traductori optici folosiți în mine și în cazul unor construcții civile.

Tabelul 4.5.

Proprietățile fizice ale principalelor materiale fotoelastice

Materialul	Constanta fotoelastică σ_0' la temperatura camerei (daN/cm franje)	Limita de elasticitate (daN/cm²)	Limita de rupere (daN/cm²)	Modul de elasticitate E (daN/cm²)	Coeficientul lui Poisson μ	Indicele de refracție n	Constanta de sensibilitate $Q = E/\sigma_0$
Sticlă	112	610	700	63×10^4	0,25	1,4—1,9	$5,6 \times 10^3$
Plexiglas	57	—	490	$2,8 \times 10^4$	0,38	1,49	$0,49 \times 10^3$
Celuloid	21	280	525	$2,45 \times 10^4$	0,33	—	$1,16 \times 10^3$
C.R.39	6,7	210	490	$1,75 \times 10^4$	—	1,505	$2,60 \times 10^3$
Araldit CT 200 sau 6020	4,35	—	700	$2,8 \times 10^4$	0,4	1,6	$6,45 \times 10^3$
Gelatină	$9,1 \times 10^{-3}$	—	—	0,77	0,5	—	84,5

Obs.: Constanta fotoelastică σ_0' a fost determinată în lumină de mercur verde cu $\lambda = 5461$ Å.

Scanned with OKEN Scanner

Răşina CR. 39. Este unul din cele mai utilizate materiale fotoelastice fiind întîlnită pe piaţă sub formă de plăci gata turnate de diferite grosimi şi cu suprafeţe bine şlefuite. Prezintă dezavantajul că după turnare şi tratare termică mai menţine o serie de tensiuni remanente pe grosime care nu afectează determinările prin incidenţă normală. De asemenea, este casantă pentru prelucrarea pe maşini unelte şi de aceea trebuie prelucrată cu multă atenţie pentru a se evita spargerea.

Plexiglasul. Este un material transparent sau colorat, foarte des întîlnit în practică. Are o sensibilitate optică scăzută. De aceea se utilizează la confecţionarea unor modele la care se urmăreşte starea de tensiune numai într-o anumită zonă în care se introduce un material cu sensibilitate optică ridicată. De asemenea, se foloseşte la confecţionarea modelelor plane pentru determinarea izoclinelor. Este casant şi de aceea trebuie prelucrat cu grijă.

Gelatina. Se foloseşte aproape în exclusivitate la confecţionarea modelelor fotoelastice pentru studiul unor elemente din domeniul construcţiilor civile unde se ţine seama de greutatea proprie. Gelatina are un modul de elasticitate foarte redus asociat cu o sensibilitate optică ridicată Turnată în modele, are o viaţă foarte scurtă, deteriorîndu-se rapid.

Răşini epoxidice. Din această categorie fac parte Bakelite ERL 2774 şi Araldítul 6020 sau CT 200. Răşinile epoxidice sînt cele mai utilizate materiale atît la confecţionarea modelelor fotoelastice plane cît şi la cele spaţiale. Aceste materiale au modulul de elasticitate şi sensibilitatea optică ridicate. Se prelucrează cu uşurinţă şi pot fi păstrate fără a căpăta efecte parazite. De asemenea, se toarnă bine. Araldítul se întîlneşte în comerţ sub mai multe forme. Pentru utilizare în fotoelasticitate se recomandă Araldítul B şi Araldítul D.

Araldítul B. Cînd este folosit la confecţionarea modelelor fotoelastice amestecul de turnare se compune din 25 ... 40 părţi în greutate de întăritor tip 901, la 100 părţi în greutate de răşină. Pentru obţinerea unei durităţi ridicate a materialului fotoelastic se recomandă ca amestecul de turnare să fie compus din 15 ... 35 părţi greutate întăritor 901, la 100 părţi greutate de răşină. Cei doi constituienţi ai araldítului (răşina şi întăritorul) se încălzesc pînă devin lichizi, apoi se amestecă timp de 1 ... ... 1,5 ore după care se toarnă la 120 ... 140 °C. În tabelele 4.6 şi 4.7 se dau o serie de date legate de procesul de întărire şi proprietăţile fizico-mecanice ale araldítului de tip B.

Araldítul D. Acest tip de araldit se toarnă de regulă la rece. În funcţie de caracteristicile pe care trebuie să le aibă materialul fotoelastic se prescriu diferite compoziţii ale amestecului de turnare.

Astfel pentru modelele destinate să lucreze la temperaturi între 80 ... 100 °C, amestecul de turnare se recomandă să fie compus din 45 părţi în greutate întăritor tip 901 la 100 părţi în greutate de răşină.

Cînd este necesar să se elaboreze un material cu duritate mare, amestecul de turnare trebuie alcătuit din 9 ... 10 părţi în greutate întăritor tip 951, la 100 părţi în greutate de răşină. Întăritorul, care este mai fluid, trebuie turnat treptat şi cu grijă pentru a evita formarea bulelor de aer.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.6.

Date privind procesul de întărire al Araldítului B

Timp de întărire (ore)	Temperatură de încălzire (°C)	Contracție volumică (%)
14 — 20	100	0,5 — 0,8
14	120	1,0 — 1,2
7 — 10	140	1,3 — 1,5
7	160	1,9 — 2,2
2 — 3	180	2,0 — 2,2
1 — 2	200	2,2 — 2,3

Tabelul 4.7.

Proprietăți fizice ale Araldítului B

Nr. crt.	Proprietatea fizică	Simbol	Unitatea de măsură	Valoarea
1	Greutatea specifică	γ	daN/dm³	1,1 — 1,2
2	Rezistența la rupere la tracțiune	σ_{rt}	daN/cm²	600 — 800
3	Rezistența la rupere la încovoiere	σ_{ri}	daN/cm²	900 — 1 200
4	Rezilienta	K	daN.cm/cm²	10 — 20
5	Rezistența admisibilă la temperatura camerei	σ_a	daN/cm²	400
6	Rezistența admisibilă la 130 — 200°C	σ_{at}	daN/cm²	6
7	Coeficientul lui Poisson	μ	—	0,33
8	Coeficientul de dilatare liniară	α	grd.C^{-1}	60 × 10^{-6}
9	Coeficientul de transmisie a căldurii	q	kcal/m.h.grd	0,16
10	Temperatura de lucru	t_0	°C	110 — 120
11	Temperatura de descompunere	t_d	°C	340 — 350
12	Constanta fotoelastică la temperatura camerei	σ_0	daN/cm².fr.	12 — 18

Se amestecă foarte bine timp de 1 ... 1,5 ore pentru a se omogeniza cît mai bine. În cazul în care se folosește o cantitate mai mică de întăritor, timpul de amestecare este de 2 ... 2,5 ore. În timpul amestecării temperatura compoziției de turnare crește. Cînd această tempera-

Scanned with OKEN Scanner

tură este cu 10 ... 15 °C sub temperatura de întărire (în funcţie de cantitatea care se toarnă), se începe turnarea, astfel ca la sfîrşitul turnării să fie atinsă temperatura de întărire. Timpii minimi de întărire în funcţie de temperatura de întărire pentru araldit cu 9 ... 10 părţi întăritor la 100 părţi răşină, sînt daţi în tabelul 4.8.

Tabelul 4.8.

Date privind procesul de întărire al araldítului D cu 9—10 părţi întăritor la 100 părţi răşina

Temperatura de întărire (°C)	Timpul minim de întărire (ore)
20	14 — 24
40	5 — 7
70	1 — 3
100	pînă la 10′
130	pînă la 5′

În dozarea compoziţiei se are în vedere că greutatea specifică a răşinii este $(1{,}1 \ldots 1{,}2) \times 10^{-3}$ daN/cm³, iar a întăritorului este de 10^{-3} daN/cm³.

Proprietăţile fizico-mecanice ale araldítului D rezultat din amestecul format din 9 ... 10 părţi greutate întăritor 951 şi 100 părţi greutate de răşină sînt prezentate în tabelul 4.9.

În ţara noastră se produc mai multe tipuri de răşini epoxidice care se utilizează în cantităţi mari ca materiale electroizolante în industria electrotehnică sau ca materiale anticorozive în industria producătoare de utilaj chimic. Din cercetările făcute pe răşinile epoxidice indigene [34], s-a constatat că cele din familia DINOX sînt potrivite pentru studii de fotoelasticitate, avînd proprietăţi apropiate de cele ale răşinilor din familia ARALDIT. După modul de întărire răşinile DINOX sînt de două tipuri : 1) cu întărire la rece, notate cu indicativul 010 (exemplu DINOX 010) şi 2) cu întărire la cald notate cu indicativul 110 (exemplu DINOX 110).

DINOX 010 P. Este indicat pentru cercetări de fotoelasticitate pe modele plane. La temperatura camerei răşina este lichidă şi vîscoasă. Întăritorul folosit în acest caz este trietilentetramina care se amestecă cu răşina în proporţie de 10 ... 15% la 25 ... 30°C. Întăritorul trebuie adăugat treptat (mai ales cînd este vorba de cantităţi mari) şi se amestecă timp de 1 ... 1,5 ore. În timpul omogenizării amestecului temperatura creşte ajungînd la 130 °C (în momentul întăririi).

Principalele caracteristici fizice ale răşinii DINOX 010 P sînt prezentate în tabelul 4.10.

DINOX 110. Este recomandat pentru cercetări fotoelastice pe modele spaţiale. În acest caz întăritorul este o anhidridă ftalică (DINOX 110 F) sau maleică (DINOX 110). Atît răşina cît şi întăritorul se prezintă sub formă de pulbere la temperatura camerei. Pentru prepararea amestecului de turnare, cele două componente (răşina şi întăritorul) se încălzesc la 130 ... 140 °C cînd se topesc şi devin lichide. Întăritorul în stare lichidă se amestecă cu răşina propriu-zisă în proporţie de 25 ... 35%. Compoziţia de turnare astfel obţinută se amestecă timp de 10 ... 15 minute după care se toarnă în forma pregătită şi încălzită la aceeaşi temperatură cu răşina. După întărire modelul trebuie detensionat. În acest scop modelul este încălzit la 140 °C cu o viteză de 10 °C/h şi menţinut la această tempeatură

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.9.

Proprietăţile fizice ale Araldítului D

Nr. crt.	Proprietatea fizică	Simbol	Unitatea de măsură	Valoarea
1	Modulul de elasticitate la temperatura camerei	E	daN/cm²	$(26-30)\times10^3$
2	Modulul de elasticitate la 110°C	E_t	daN/cm²	140—180
3	Constanta fotoelastică a materialului la temperatura camerei	σ_0'	daN/cm.fr.	13—15
4	Constanta fotoelastică a materialului la 110°C	σ_{0t}'	daN/cm.fr.	0,28—0,32
5	Limita de curgere la temperatura camerei	σ_c	daN/cm²	300—400
6	Limita de curgere la 110°C	σ_{ct}	daN/cm²	5—6
7	Constanta de deformaţie optică la temperatura camerei	ε_0'	fr./cm	1750—2300
8	Constanta de deformaţie optică la 110°C	ε_{0t}'	fr./cm	450—650
9	Greutatea specifică	γ	daN/dm³	1,15—1,2
10	Rezistenţa de rupere la tracţiune	σ_{rc}	daN/cm²	550—800
11	Rezistenţa de rupere la încovoiere	σ_{ri}	daN/cm²	900—1 100
12	Rezilienţa	K	daN.cm/cm²	12—15
13	Coeficientul de dilatare liniară	α	grd.C^{-1}	$(90-95)\times10^{-6}$
14	Temperatura de îngheţare	θ	°C	110 — 120

Tabelul 4.10

Proprietăţile fizice ale Dinoxului 010 P

Nr. crt.	Proprietatea fizică	Simbol	Unitatea de măsură	Valoarea
1	Greutatea specifică	γ	daN/dm³	1,1—1,2
2	Modulul de elasticitate la temperatura camerei	E	daN/cm²	$(20-30)\times10^3$
3	Constanta fotoelastică a modelului la temperatura camerei	σ_0	daN/cm².fr.	11—13
4	Timp de întărire	t	ore	48
5	Temperatura de îngheţare	θ	°C	110—120

Scanned with OKEN Scanner

timp de 3 ore după care se răcește cu o viteză de 5 °C/h. Principalele proprietăți fizice ale Dinoxului 110 cu o compoziție alcătuită din 30 părți greutate de întăritor la 100 părți greutate rășină [34] sînt prezentate în tabelul 4.11.

Tabelul 4.11

Proprietățile fizice ale Dinoxului 110 F

Nr. crt.	Proprietatea fizică	Simbol	Unitatea de măsură	Valoarea
1	Greutatea specifică	γ	daN/dm^3	1,1—1,2
2	Modulul de elasticitate la temperatura camerei	E	daN/cm^2	28,5 × 10^3
3	Constanta fotoelastică a materialului la temperatura camerei	σ_0'	daN/cm.fr.	9,7
4	Constanta fotoelastică a modelului la 105°C	σ_0	daN/cm^2.fr.	0,424
5	Constanta fotoelastică a materialului la 105°C	σ_0'	daN/cm.fr.	0,254
6	Temperatura de îngheţare	θ	°C	105
7	Rezistența de rupere la tracțiune	σ_{rt}	daN/cm^2	394—675
8	Lungirea specifică la rupere	ε_r	%	2,6—5

BIBLIOGRAFIE

1. AGÂRBICEANU, I., *Lumina polarizată și aplicațiile ei în știință și tehnică*, București, 1956.
2. BUZDUGAN, GH., *Rezistența materialelor*, Editura tehnică, București, 1974.
3. BRAHTZ, J.H.A., and SOEHRENS, J. E., *Direct Optical Measurement of Individual Principal Stresses*, Journal Applied Physics, vol. 10 nr. 4, Apr. 1939.
4. BOLEANTU, L., KASTELL, O., *Comparative Analysis of the Stress Concentration with a Plane and Space Model*. Symposium on Experimental Techniques in Applied Mechanics, Polytehnic Institute Bucharest, 1 — 3 November 1972.
5. BRILLHART, L. V., DALLY, J. E., *A Dynamic Photoelastic Investigation of Stress -wave Propagation in Cones.*, Experimental Mechanics, April 1968, pag. 145 — 153.
6. DALLY, J. W., RILEY, W. F., *Experimental Stress Analysis*, New York, Mc Graw-Hill Book Co., 1965.
7. DURELLI, A. J., RILEY, W. F., *Introduction in Photomechanics*, Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, Prentice Hall, Inc. 1965.
8. FROCHT, M. M., *Photoelasticity*, vol. I, II John Wiley and Sons, 1948, 1949.
9. FÖPPL, MÖNCH, E., *Praktische Spannungsoptik*, Berlin, Springer-Verlag, 1959.
10. FAVRE, H., *Sur une Nouvelle Méthode optique de détermination des tension interieures*, Revue d'optique, vol. 8, nr. 5, 6, 7, May, June, July, 1929, pag. 192 și 241.

Scanned with OKEN Scanner

11. FABRY, C., *Sur une Nouvelle Méthode pour l'étude expérimentale des tensions élastiques*, Comptes rendus, Paris, vol. 190, 1930, pag. 457 — 460.
12. FOURNEY, M. E., *Application of Holography to Photoelasticity*, Experimental Mechanix, nr. 8(1) 1968, pag. 33 — 38.
13. FROST, T. H., WHITCOMB, K. F., *The Stresses in Rotating Disks*, Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, v. 53. 1931. pg. 1 — 11.
14. FROCHT, M. M., FLYNN, P. D., LANDSBERG, D., *Dynamic Photoelasticity by Means of Streak Photography, Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, v. 14, nr. 2, 1957 pg. 81 — 90.
15. FLYNN, P. D., FROCHT, M. M., *On the Photoelastic Separation of Principal Stresses under Dynamic Conditions by Oblique Incidence*, Journal of Applied Mechanics v. 28, nr. 1, 1961, pg. 144 — 145.
16. GOLDSMITH, W., *Dynamic Photoelasticity*, Experimental Techniques in Shock and Vibration, W. J. Worley, ed. ASME 1962, pg. 25 — 54.
17. GOLDSMITH, W., DABAGHIAN, L., *Photoelastic and Strain-gage Investigation of Penetration of Thin Plates*, Experimental Mechanics, October 1961, pg. 121 — 128.
18. HETENYI, M., *Handbook of Experimental Stress Analysis*, John Wiley and sons, Inc. New York, London 1950.
19. HOLISTER, G. S., *Experimental Stress Analysis Principles and Methods.*, Cambridge University Press, 1967.
20. IOSIPESCU, N., *Introducere în fotoelasticitate*, vol. I, II, Editura tehnică, București, 1958, 1960.
21. ILIESCU, N., TIPERCIUC, GH., TUDOSE, I., *Fotoelasticitate*, Indrumar pentru lucrări de laborator, Institutul Politehnic București, 1973.
22. ILIESCU, N., TIPERCIUC, GH., BORZA, D., *Distribuția tensiunilor în platbande găurite solicitate la întindere prin intermedtul unui bolț.*, Institutul Politehnic București, 1974.
23. ILIESCU, N., *The Study of Stress Wave propagation in a Conical Bar by Dynamic Photoelasticity.*, Symposium on Experimental Techniques in Applied Mechanics., Polytehnic Institute Bucharest, 1 — 3 November 1972.
24. ILIESCU, N., *Etalonarea materialelor fotoelastice în regim dinamic*, Sesiunea științifică a Institutului Politehnic București decembrie 1972.
25. ILIESCU, N., *Determinarea experimentală a propagării undei de eforturi în barele de formă conică*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic București, 1972.
26. *Ispolizovanie metoda fotouprugosti pri reșenii injenernih zadaci* Gosudarstvennoe Energhiceskoe Izatelistvo, Moskva-Leningrad, 1962.
27. JESSOP, H. T., HARRIS, F. C. *Photoélasticité*, Paris, Dunod, 1952.
28. KOLSKY, H. *Stress Waves in solids*, Dover Publication, Inc. 1963.
29. LAGARDE, A. *Sur le problème de la résponse photoélastique d'un matériau viscoélastique en régime dynamique*. Compte Rendus de L'Académie des Sciences, Paris v. 251, nr. 5, 1960, pg. 633 — 635.
30. LANDON, I. W., QUINNEY, I., *Experim nts with Hopkinson* — Pressure Bar., Proc. Roy. Soc. (London) A. 103, pg. 639 — 643.
31. MALININ, N., N., FEODOSIEV, V. L., *Calculul de rezistență în construcția de mașini*, vol. I, București, Editura Tehnică, 1960.
32. MÜLLER, K. H. JOST. P., *Polarisationsoptische Spannungsmessung an schnellumlaufenden Maschinenteilen*, Forschung auf dem Gebiet des Ingeniaurwesens, v. 26, nr. 3, 1960, pg. 80 — 82.
33. MALISEV, L. K., *Primenenie metoda fotounprugosti k issledovaniu rasprostranenia voln napriajenii*, Stroitelstva Mechanika i rasciot soorujenii, no. 6, 1960.
34. MINDRU, I., HUIDU, T., *Asupra folosirii rășinilor epoxidice în fotoelasticitate*. Studii și cercetări de mecanică aplicată nr. 3, tomul 25, 1967, Editura Academiei R.S.R.
35. NISIDA, M., HONDO, M., *New Photoelastic Procedures for Solvind Torsion Problems*. Proc. of the 7 the Japan National Congress for Applied Mechanics, 1957.
36. O'REGAN, R., *An Electrooptic Analog for the Solution of the Laplace Equation*, Journal of Applied Mechanics, 34, 2, 1967.
37. POST, D., *A New Photoelastic Interferomiter Suitable for Static and Dynamic Measurements*, Proc. SESA, vol. XII, nr. 1, 1954.
38. PASTRAV, I. și MIRON, L., *Studiul variației tensiunilor în platbanda cu lățime variabilă și racordări circulare*, Buletinul științific al Institutului Politehnic Cluj, vol. 11/1, 1968.

Scanned with OKEN Scanner

39. PASTRAV, I., *Analogia electro-optică — metodă auxiliară în foloelasticimetrie*, Studii și Cercetări de Mecanică Aplicată, **33**, nr. 3, 1974, p. 563 — 568.

40. PASTRAV, I., *Studiul barelor prismatice solicitate la răsucire* (comunicare).

41. *Polearizaționno opticeski metod isledovania napriajenii*. Trudi konferenții 13 — 21 fevralia 1958. Izdatelistvo Leningradskogo Universiteta, 1960.

42. *Primenenie opticeskogo metoda dlia isledovania napriajennogo sostoiania norod vokrug gornih virabotok*. Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moskva, 1963.

43. RUSU, O., GALL, T., *Probleme moderne ale rezistenței materialelor*, București, Editura tehnică, 1970.

44. SALVADOR, M. G., BARON, M. L., *Metode numerice în tehnică.*, Editura tehnică, București, 1972.

45. SINCLAIR R, D., *A New Optical Method for Determination of the Principal Stress*, Sum. Proc. 10-th Eastern Photoelasticity Conf., 1939.

46. TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N., — *Theory of Elasticity*, Third Edition, Mc Graw-Hill Book Co., 1970 .

47. TUZI, Z., NISIDA, M., *Photoelastic Study of Stress Due to Impact*, Scientific Papers of the Institute of Phisical and Chemical Research, Tokyo, Japan, nr. 566, April 1935, pg. 277 — 309.

48. WOLF, H., *Spannungsoptik*, Springer Verlag, Berlin — Göttingen — Heidelberg, 1961.

Scanned with OKEN Scanner

5

METODE INTERFEROMETRICE

Prof. dr. doc. ing. D.R. MOCANU,
Dr. ing. C. ATANASIU

5.1. UTILIZAREA FENOMENULUI MOIRÉ ÎN TENSOMETRIE

5.1.1. PUNEREA ÎN EVIDENȚĂ A FENOMENULUI

Fenomenul moiré apare în urma suprapunerii a două rețele de linii sau puncte. Dacă cele două rețele nu coincid ca distanță între linii sau ca orientare, se obțin așa-zisele *franje moiré*.

La ora actuală, pentru obținerea franjelor moiré, se utilizează următoarele tehnici :

— interferența geometrică (mecanică) ;
— interferența optică, sau
— interferența geometrică + interferența optică.

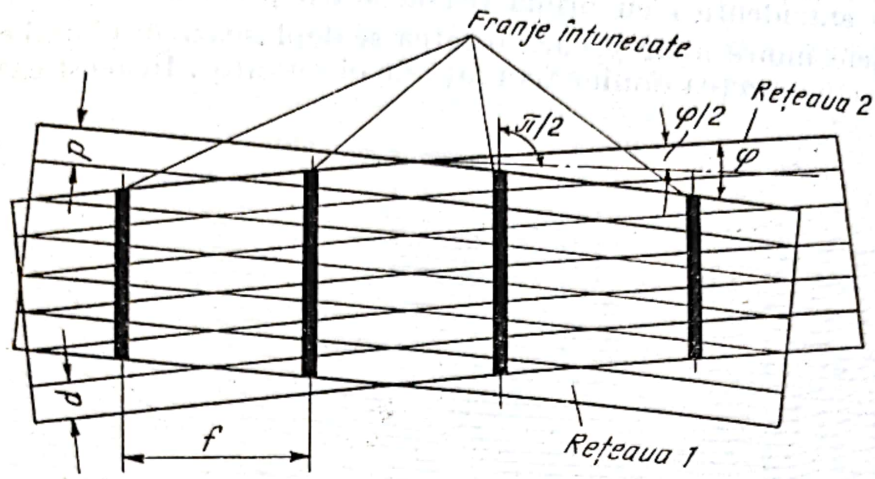
Cu toate că fenomenul moiré este cunoscut încă din secolul trecut, nu i s-a dat atenția cuvenită, decît în ultimele decenii, aceasta datorită, în primul rînd, dificultăților întîmpinate la realizarea unor rețele corespunzătoare și la aplicarea tehnicii de lucru.

Progresele realizate în ultimele două decenii în tehnica fabricării rețelelor, utilizate la obținerea franjelor moiré, au contribuit, în mare măsură, la extinderea utilizării acestora în metrologie.

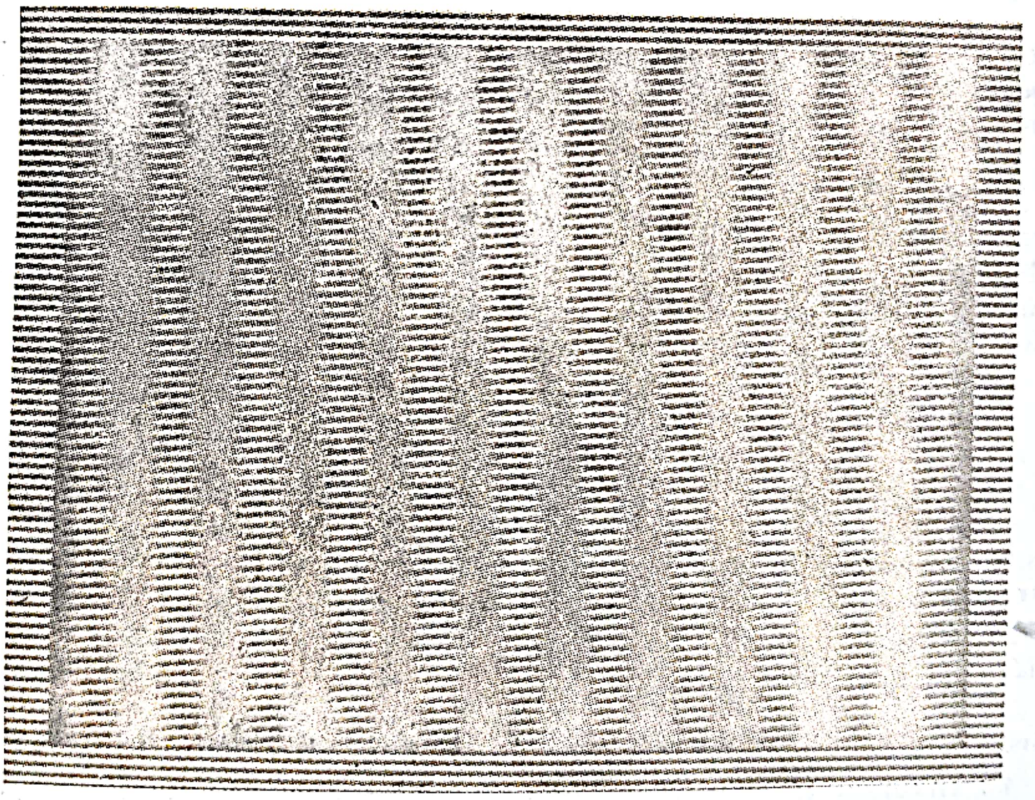
Dacă două rețele — realizate pe geam — avînd același număr de linii și fante pe centimetru, se suprapun cu liniile ușor înclinate și se privesc pe un fond de lumină albă difuză, se observă, fără vreun echipament optic special, franjele moiré.

În fig. 5.1 se prezintă schema (fig. 5.1,a) și fotografia (fig. 5.1,b) franjelor moiré rezultate din suprapunerea a două rețele identice înclinate cu unghiul φ și iluminate cu lumină difuză. Franjele sînt echidistante și pasul f al acestora crește odată cu creșterea unghiului φ. Dacă cele două rețele sînt suprapuse astfel încît liniile lor să fie paralele și, ulterior, pasul uneia din rețele se modifică datorită unei deformații suferită de rețeaua respectivă, se vor forma, de asemenea, franje moiré, pasul acestora f fiind cu atît mai mic cu cît deformația rețelei este mai mare.

Scanned with OKEN Scanner



a



b

Fig. 5.1.

Scanned with OKEN Scanner

În fig. 5.2. se prezintă schema franjelor moiré rezultate din suprapunerea unei rețele de linii drepte cu o rețea deformată, care înainte de deformare era identică cu prima (cazul stării plane de tensiune).

Franjele moiré apar și dacă o rețea se deplasează în planul ei propriu în timp ce a doua rețea rămîne fixă față de observator. În acest caz franjele

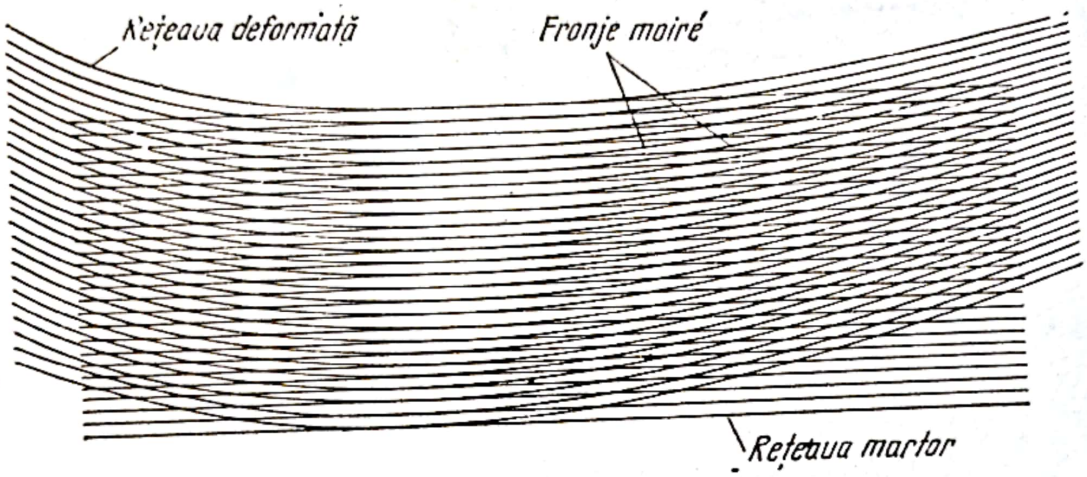


Fig. 5.2.

ce rezultă din suprapunerea celor două rețele se mișcă după o direcție perpendiculară pe liniile rețelei fixe, iar numărul franjelor ce traversează un punct fix este egal cu numărul liniilor rețelei mobile ce traversează acel punct.

În general, variațiile cu direcția și poziția a franjelor moiré, sînt relativ mari în comparație cu deformațiile sau deplasările rețelei care produce aceste variații, din care cauză ele constituie, la ora actuală, o metodă de mare sensibilitate pentru măsurarea deformațiilor și deplasărilor.

5.1.2. DEFINIȚII ȘI NOTAȚII

1°. Se consideră că rețelele utilizate pentru obținerea franjelor moiré sînt perfecte; văzute la microscop apar formate din linii opace, paralele și echidistante. Liniile sînt separate prin fante transparente de aceeași lățime, adică *coeficientul de transmitere este de 50%*.

2°. Ansamblul format dintr-o linie opacă sau șanț și o fantă transparentă se numește *linia rețelei*.

3°. Distanța dintre marginea unei linii opace și marginea corespunzătoare a liniei ce urmează se numește *pasul rețelei* și se notează cu p.

4°. Inversul pasului reprezintă *frecvența* rețelei și se exprimă prin numărul de linii cuprinse în unitatea de lungime (mm).

5°. Direcția perpendiculară pe liniile rețelei și situată în planul acestora se numește *direcție principală*, iar direcția paralelă cu liniile rețelei se numește *direcție secundară*.

Scanned with OKEN Scanner

6°. Distanța dintre axele a două franje succesive se numește *interfranjă* și se notează cu f (pasul franjelor).

7°. Familia liniilor corespunzînd rețelei care nu se deformează în timpul încercărilor se numește *rețea de referință* sau *rețea martor* (*R.M.*) și se exprimă prin relația $F_1(x, y) = k_1$. Familia liniilor corespunzătoare *rețelei deformate* (*RD*) se exprimă prin relația $F_2(x, y) = k_2$; unde k_1 și k_2 sînt parametrii de indexare (de familie) care definesc distanțarea curbelor individuale. Ei variază în salturi unitare și pot fi pozitivi sau negativi, iar x și y reprezintă coordonatele unui punct din planul modelului care este și planul suprapunerii celor două rețele.

8°. Franjele rezultate din suprapunerea celor două rețele, ale căror forme sînt definite de funcțiile $F_1(x, y) = k_1$ și $F_2(x, y) = k_2$, formează o familie indexată de curbe $M(x, y) = m$. Indicele franjelor, m, trebuie să satisfacă o ecuație de indici, care, în cazul sistemelor cu două rețele, este de forma $k_1 \pm k_2 = m$.

În fig. 5.3 se prezintă schematic cazul general a două rețele, exprimate prin ecuațiile $F_1(x, y) = k_1$ și $F_2(x, y) = k_2$, suprapuse în așa fel încît

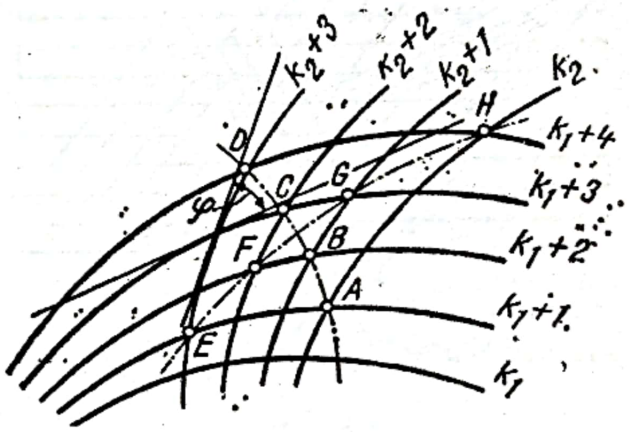


Fig. 5.3.

curbele lor să formeze un unghi variabil $\varphi(x, y)$. Cele două diagonale curbilinii ale fiecărui patrulater corespund franjelor moiré care satisfac, fie ecuația $k_1 - k_2 = m$, fie ecuația $k_1 + k_2 = m$. Punctele A, B, C, D, ... corespund unei franje pentru care $k_1 - k_2 =$ constant, în timp ce punctele E, F, G, H, corespund unei franje pentru care $k_1 - k_2 =$ const.

9°. Franjele moiré pentru care este valabilă ecuația $k_1 - k_2 = \mathrm{m}$, se numesc franje *sustractive* (scăzătoare) și franjele pentru care este valabilă ecuația $k_1 + k_2 = \mathrm{m}$, se numesc franje *aditive*.

Franjele vizibile sînt acelea care au cea mai mare interfranjă f, adică franjele care coincid cu diagonalele scurte ale patrulaterelor. În cazul din fig. 5.3 franjele vizibile sînt cele care conțin franja $A, B, C, D \ldots$ și sînt franje *sustractive*.

10°. Deoarece forma și dimensiunile patrulaterelor formate din cele două rețele variază cu deplasarea relativă a rețelelor, este posibil ca franjele de tip sustractiv să se transforme în franje de tip aditiv și viceversa. Zona de trecere a franjelor de la un tip la altul poate fi definită drept

regiunea care conţine numai dreptunghiuri şi pătrate, liniile celor două reţele fiind perpendiculare între ele. Această zonă se numeşte *zonă* sau *linie de frontieră*.

Pentru o mai bună punere în evidenţă a naturii fenomenului moiré, în fig. 5.4 se prezintă, la o scară mărită, două reţele identice, cu coeficientul de transmitere 50%.

După suprapunerea celor două reţele se formează o serie de romburi cu trei nuanţe de culoare : albe, întunecate şi negre. Diagonalele cele mai scurte ale romburilor întunecate formează linii drepte care reprezintă

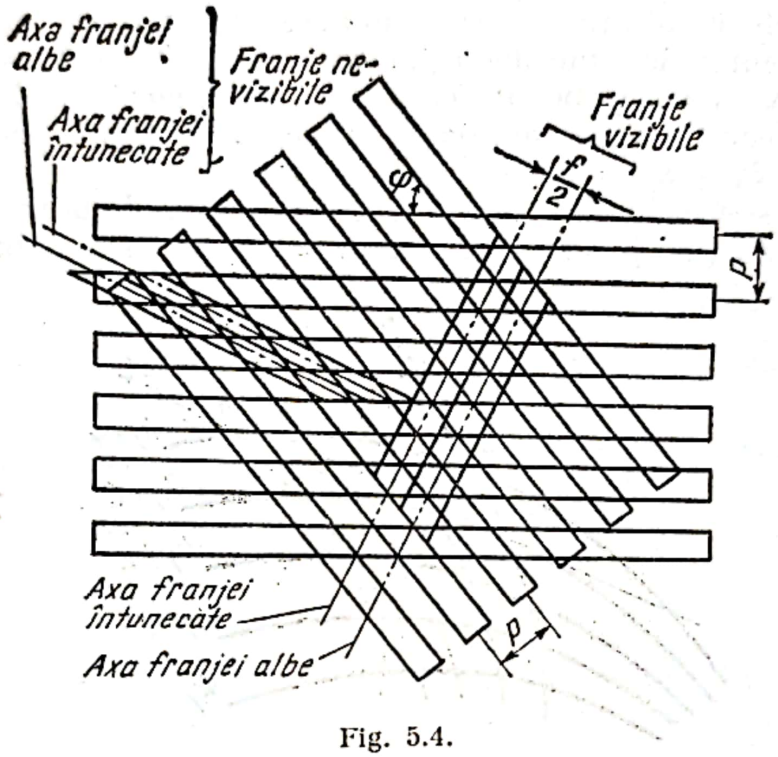


Fig. 5.4.

axele centrale ale franjelor întunecate, iar diagonalele cele mai scurte ale romburilor succesive albe şi negre formează axele centrale ale franjelor luminoase de tip sustractiv.

Acelaşi raţionament se poate face şi în cazul diagonalelor mai lungi. În acest caz, franjele moiré, care sînt de tip aditiv, nu sînt vizibile.

Formarea franjelor urmează acelaşi principiu şi în cazul general cînd liniile reţelelor formează curbe de un grad oarecare, iar romburile devin patrulatere curbilinii ale căror diagonale scurte formează franjele moiré.

5.1.3. EXPRESIA ANALITICĂ A FRANJELOR MOIRÉ

La început cercetările teoretice şi experimentale cu privire la franjele moiré s-au limitat la franjele obţinute prin interferenţa reţelelor formate din linii drepte paralele. Aceasta datorită faptului că aplicaţiile efectului moiré, iniţial, s-au limitat la măsurarea deplasărilor rectilinii. Ulterior, Lehman şi Wiemer [47], au tratat cazurile franjelor moiré obţinute prin suprapunerea reţelelor radiale şi concentrice echidistante, exprimînd

ecuațiile familiilor de curbe sub formă de indici. Studii similare au fost făcute și de alți cercetători [46], [62], [97]. De asemenea, Pirard [71] a stabilit relațiile parametrice pentru familiile de franje moiré rezultate prin suprapunerea de diferite combinații de linii drepte, linii radiale, cercuri concentrice ș.a...

Cele două familii de curbe (rețeaua martor și rețeaua deformată), așa cum s-a arătat la § 5.1.2 se exprimă prin

$$F_1(x, y) = k_1 \quad \text{și} \quad F_2(x, y) = k_2. \tag{5.1}$$

Diagonalele paralelogramelor obținute cu cele două rețele formează alte două familii de franje moiré, care se exprimă prin ecuațiile :

$$M_a(x, y) = m_a \quad \text{și} \quad M_s(x, y) = m_s. \tag{5.2}$$

Distanțele dintre liniile succesive ale celor două familii de curbe reprezintă — așa cum s-a arătat la §. 5.1.2 pasurile p ale rețelelor respective, iar cele corespunzătoare familiilor diagonalelor exprimă distanțele dintre franje, adică *interfranja f*.

Punctele *A*, *B*, *C*, *D* (fig. 5.3) situate pe o franjă sustractivă îndeplinesc condiția de constanță a diferenței funcțiilor $F_1(x, y) = k_1$ și $F_2(x, y) = k_2$, iar ecuația franjei respective rezultă din formula :

$$M_1(x, y) = F_1(x, y) - F_2(x, y) = k_1 - k_2. \tag{5.3}$$

Punctele *E*, *F*, *G*, *H* (din aceeași figură) situate pe o franjă aditivă îndeplinesc condiția constantei sumei celor două funcții, adică :

$$M_2(x, y) = F_1(x, y) + F_2(x, y) = k_1 + k_2 \tag{5.4}$$

Franjele moiré vizibile, așa cum s-a menționat, sînt acelea care au cea mai mare interfranjă, respectiv care corespund diagonalelor cele mai scurte (vezi fig. 5.3).

Într-o regiune a probei pot fi vizibile franjele sustractive, corespunzînd ecuației (5.3), iar în altă regiune pot fi vizibile franjele aditive date de ecuația (5.4). Trecerea de la franjele sustractive la cele aditive se face prin modificarea raportului dintre diagonalele patrulaterelor. Așa cum s-a amintit, în zona de frontieră, în care patrulaterele au diagonalele egale, nu apar franje moiré vizibile.

În punctele zonei de frontieră liniile celor două rețele (rețeaua martor și rețeaua deformată) sînt perpendiculare între ele, deci produsul coeficienților unghiulari este :

$$\frac{F'_{1x}}{F'_{1y}} \cdot \frac{F_{2x}}{F'_{2y}} = -1. \tag{5.5}$$

Ecuația liniei de frontieră dintre cele două tipuri de franje moiré, date de ecuațiile (5.3) și (5.4), este

$$\psi(x, y) = F'_{1x} \cdot F'_{2x} + F'_{1y} \cdot F'_{2y} = 0. \tag{5.6}$$

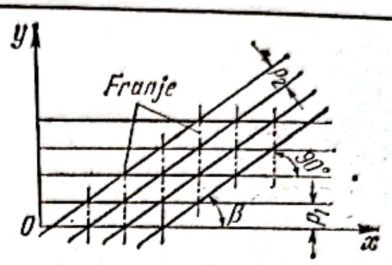
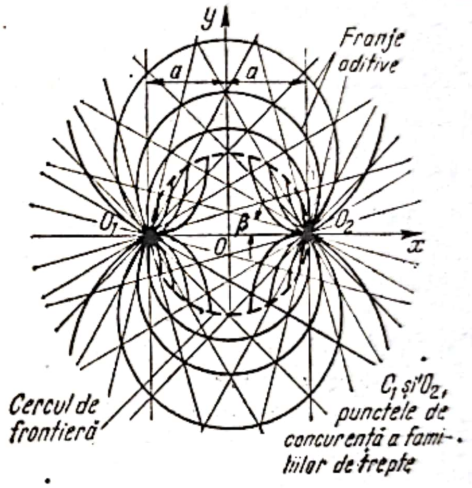
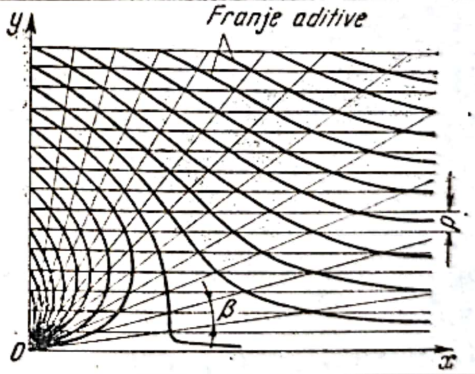
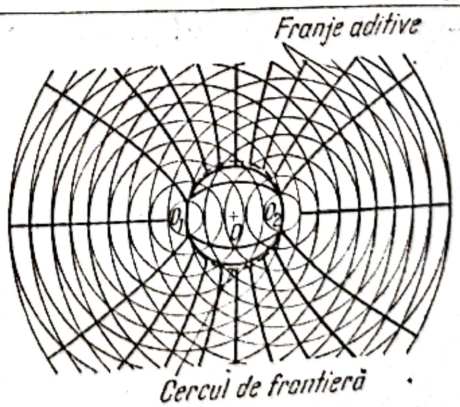
În tabelul 5.1 se dau expresiile analitice ale franjelor rezultate din suprapunerea a două rețele diferite.

Scanned with OKEN Scanner

Ncr. crt.	Forma rețelelor suprapuse	Ecuațiile rețelelor	Ecuația liniei de frontieră
1	2	3	4
1	Două rețele de linii drepte paralele	$F_1(x) = \frac{y}{p_1} = k_1$ $F_2(x, y) = \frac{y\cos\beta - x\sin\beta}{p_2} = k_2$	$\psi(x, y) = \frac{\cos\beta}{p_1 \cdot p_2} = 0$
2	Două rețele de drepte concurente	$F_1(x, y) = \frac{1}{\beta}\operatorname{arc\,tg}\frac{y}{x+a} = k_1$ $F_2(x, y) = \frac{1}{\beta}\operatorname{arc\,tg}\frac{y}{x-a} = k_2$	$\psi(x, y) = \frac{x^2 + y^2 - a^2}{\beta^2\,[(x+a)^2 + y^2]\,[(x-a)^2 - y^2]}$
3	O rețea de drepte paralele și o rețea de drepte concurente	$F_1(x, y) = \frac{y}{p_1} = k_1$ $F_2(x, y) = \frac{1}{\beta}\operatorname{arc\,tg}\frac{x}{y} = k_2$	$\psi(x, y) = \frac{x}{p\,x\,(x^2 + y^2)}$
4	Două rețele de cercuri concentrice având centrele în O_1 și O_2 și pasurile p_1 și p_2	$F_1(x, y) = \frac{1}{p_1}\sqrt{(x+a)^2 + y^2} = k_1$ $F_2(x, y) = \frac{1}{p_2}\sqrt{(x-a)^2 + y^2} = k_2$	$\psi(x, y) = \frac{x^2 + y^2 - a^2}{p_1 p_2\sqrt{[(x+a)^2+y^2]\,[(x-a)^2+y^2]}}$

Scanned with OKEN Scanner

rezultate din suprapunerea a două rețele

Ecuația franjelor U	Figura cu rețelele și franjele
5	6
$M_1(x, y) = \frac{y}{p_1} - \frac{y\cos\beta - x\sin\beta}{p_2}$	
Pentru exteriorul cercului de frontieră $M_1(x,y) = \frac{1}{\beta}\left[(\text{arc tg}\frac{y}{x+a} - \text{arc tg}\frac{y}{y-a}\right]$ Pentru interiorul cercului de frontieră $M_2(x,y) = \frac{1}{\beta}\left(\text{arc tg}\frac{y}{x+a} + \text{arc tg}\frac{y}{x-a}\right)$	
$M_1(x, y) = \frac{y}{p} - \frac{1}{\beta}\text{arc tg}\frac{y}{x}$	
$M_1(x, y) = \frac{1}{p_1}\sqrt{(x+a)^2+y^2} - \frac{1}{p^2}\sqrt{(x-a)^2+y^2}$	

1	2	3	4
5	O rețea de drepte paralele și o rețea de cercuri concentrice echidistante	$F_1(x, y) = \frac{y}{p_1} = k_1$ $F_2(x,y) = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{p_2^2}} = k_2$	$\psi = \frac{2y}{p_2^2} \cdot \frac{1}{p_1} = 0$ Linia de frontieră este axa Ox
6	O rețea de drepte paralele cu o rețea de parabole	$F_1(x, y) = \frac{y \cos \beta - x \sin \beta}{p_1} = k_1$ $F_2(x, y) = \frac{2p_2 x - y^2}{2p_2^2} = k_2$	$\psi = \frac{1}{p_1} \cdot \frac{\sin \beta}{p_2} + \frac{y \cos \beta}{p_1^2 p_2^2} = 0$

5.1.4. CALCULUL INTERFRANJEI

Se consideră două franje moiré sustractive succesive, formate de două rețele suprapuse (fig. 5.5). Rețelele au indicii k_1 și k_2, iar indicii celor două franje sînt m și $m + 1$. Interfranja f_s este determinată de distanța OR măsurată pe perpendiculara n în punctul O la franja m. Considerînd triunghiul OSR, interfranja sustractivă este dată de relația

$$f_s = OS \sin (\varphi - \beta) \tag{5.7}$$

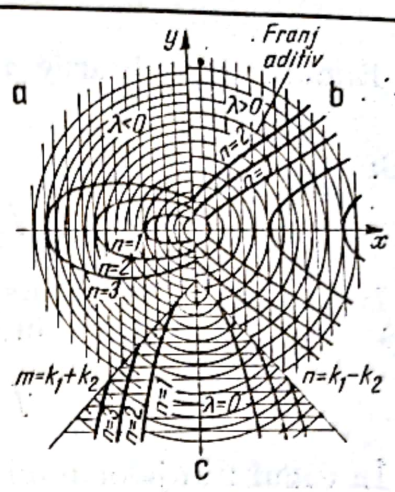
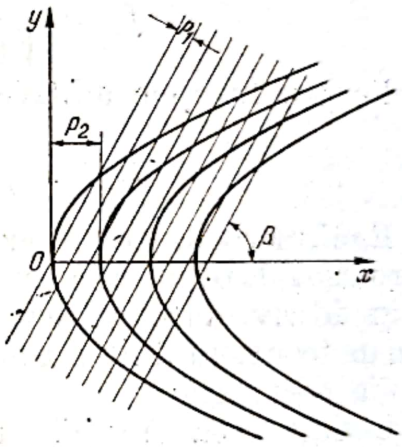
unde

$$OS = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial m}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial m}\right)^2}. \tag{5.8}$$

Din fig. 5.5 se observă că

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{M'_x}{M'_y} \tag{5.9}$$

Scanned with OKEN Scanner

5	6
$M_1(x, y) = \sqrt{\frac{x^2+y^2}{p_2^2}} - \frac{y}{p_1} = k_1 - k_1$ Franje sustractive (deasupra axei Ox) $M_2(x, y) = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{p_2^2} + \frac{y}{p_1} = k_1 + k_2$ Franje aditive (sub axa Ox).	
Dacă $\beta > \frac{\pi}{2}$; franje sustractive $M_1(x, y) = \frac{2px_2 - y^2}{2p_2^2} - \frac{1}{p_1}(y\cos\beta - x\sin\beta) = k_1 - k_2$ Dacă $\beta < -\frac{\pi}{2}$; franje aditive $M_2(x, y) = \frac{2p_2x - y^2}{2p_2^2} + \frac{1}{p_1}(y\cos\beta - x\sin\beta) = k_1 + k_2$	

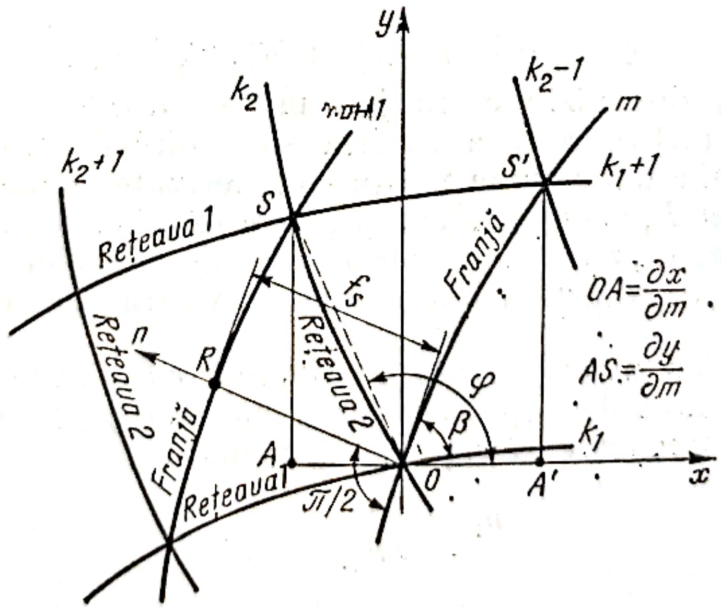


Fig. 5.5.

și

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y'_x}{x'_y}. \tag{5.10}$$

Eliminînd unghiurile φ și β din relația (5.7) și ținînd seamă că [97]

$$M'_x x'_m + M'_y y'_m = 1$$

rezultă

$$f_s = \frac{\delta_m}{\sqrt{M'^2_x + M'^2_y}}. \tag{5.11}$$

Deoarece s-a presupus că parametrul m variază în salturi unitare, adică $\delta_m = 1$, valoarea interfranjei este dată de relația:

$$f_s = \frac{1}{\sqrt{M'^2_x + M'^2_y}}. \tag{5.12}$$

În cazul franjelor moiré sustractive (relația 5.3), rezultate din suprapunerea a două familii de curbe $F_1(x, y)$ și $F_2(x, y)$, relația (5.12) devine

$$f_s = \frac{1}{\sqrt{(F'_{1x} - F'_{2x})^2 + (F'_{1y} - F'_{2y})^2}}. \tag{5.13}$$

Pentru franjele aditive

$$f_a = \frac{1}{\sqrt{(F'_{1x} + F'_{2x})^2 + (F'_{1y} + F'_{2y})^2}}. \tag{5.14}$$

Egalitatea dintre interfranja corespunzătoare franjelor moiré de tip sustractiv, date de relația (5.13) și interfranja corespunzătoare franjelor de tip aditiv, date de relația (5.14) exprimă ecuația parametrică (5.6) a liniei de frontieră dintre zona cu franje vizibile sustractive și zona cu franje vizibile aditive.

Condiția ca franjele moiré să fie sustractive este

$$f_s > f_a$$

adică

$$\psi(x, y) = F'_{1x} F'_{2x} + F'_{1y} F'_{2y} > 0. \tag{5.15}$$

Dacă $f_a > f_s$ sînt vizibile franjele moiré aditive.

Din relația (5.15), rezultă că franjele moiré de tip sustractiv sînt vizibile în regiunile unde suma produselor derivatelor parțiale de ordinul întîi ale funcțiilor $F_1(x, y)$ și $F_2(x, y)$, care exprimă familiile de linii ale celor două rețele, față de axele principale ale rețelelor — este pozitivă. În regiunile în care această sumă este negativă franjele moiré sînt de tip aditiv.

Aplicînd raționamentul utilizat la deducerea relațiilor (5.13) și (5.14) se stabilesc următoarele expresii pentru pasurile p_1 și p_2 ale liniilor ce formează rețeaua martor și rețeaua deformată:

$$p_1 = \frac{1}{\sqrt{F'^2_{1x} + F'^2_{1y}}} \tag{5.16}$$

$$p_2 = \frac{1}{\sqrt{F'^2_{2x} + F'^2_{2y}}}. \tag{5.17}$$

Scanned with OKEN Scanner

Introducînd aceste relaţii în (5.13) şi (5.14) şi ţinînd seamă de (5.15), ((5.16) şi (6.17), se obţine următoarea relaţie pentru calculul interfranjei, într-un anumit punct, în funcţie de pasurile celor două reţele şi de cos β :

$$f = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{(p_1^2 + p_2^2 \pm p_1 p_2 \cos \beta)}}; \tag{5.18}$$

În relaţia (5.18) semnul pozitiv corespunde franjelor aditive şi semnul negativ celor sustractive.

Pentru punctele situate pe linia de frontieră ($\psi = 0$) interfranja este dată de relaţia :

$$f_f = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2}}. \tag{5.19}$$

5.2. UTILIZAREA FRANJELOR MOIRÉ REALIZATE PRIN IMPRIMAREA REŢELEI DIRECT PE MODEL

5.2.1. PRINCIPIUL METODEI

Tensometria bazată pe interpretarea franjelor moiré rezultate din suprapunerea reţelei martor peste reţeaua imprimată pe model, iniţiată şi pusă la punct de Dantu [11], [12], a căpătat o largă utilizare la studiul deformaţiilor şi al tensiunilor, atît în domeniul elastic cît şi în domeniul elasto-plastic.

Franjele moiré sînt obţinute prin interferenţă mecanică, deci metoda are, aşa cum s-a arătat, un caracter pur geometric, fără să facă apel la vreun fenomen fizic.

Pentru obţinerea franjelor se imprimă pe modelul de studiat o reţea de linii echidistante şi se dispune de o reţea identică cu aceasta, reţeaua martor (RM).

După deformarea modelului, care face obiectul cercetării, în urma solicitării la care este supus, liniile reţelei imprimate se vor deforma suferind, în cazul general, rotaţii şi translaţii. Prin suprapunerea reţelei martor (RM) peste reţeaua deformată, imprimată pe model (RD), se obţin franjele moiré.

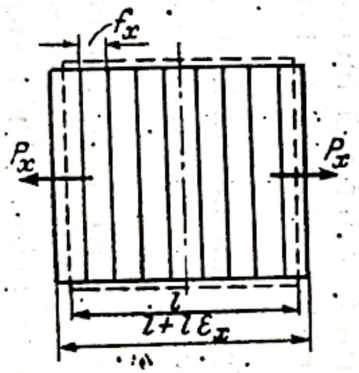
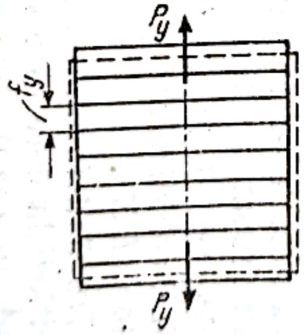
Prin interpretarea matematică a franjelor, aşa cum se va arăta, pot fi determinare în cazul stării plane de solicitare deformaţiile specifice ε_x, ε_y şi γ_{xy}, într-un punct oarecare a planului reţelei, definindu-se, aştfel, în întregime, starea de deformaţie a modelului studiat.

În majoritatea cazurilor, întîlnite în practică, numai o singură reţea şi anume reţeaua martor poate fi exprimată analitic. Reţeaua deformată (RD), imprimată pe model, ca şi reţeaua de franje moiré (rezultantă a primelor două reţele) au, în general, forme neregulate legate de valoarea deformaţiilor liniare şi unghiulare suferite de model. Ca urmare, ele nu pot fi exprimate analitic decît numai în cazuri particulare cînd modelul este supus unei solicitări simple (de exemplu primele trei cazuri din tabela 5.2).

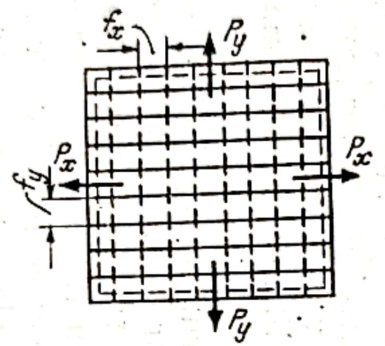
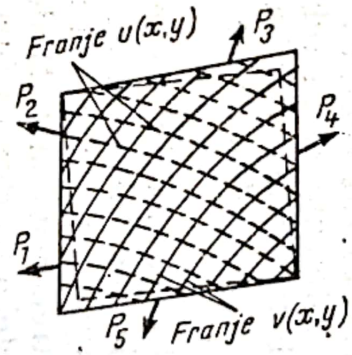
Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.2

Franjele moiré în cazul unui model supus la stare monoaxială, biaxială şi la stare plană de solicitare

Nr. crt.	Solicitarea modelului	Schema franjelor moiré	Deformaţiile specifice	Poziţia reţelei martor	Poziţia franjelor
1	Întindere după direcţia Ox		$\varepsilon_x \neq 0$ $\varepsilon_y = 0$ $\gamma_{xy} = 0$	Orizontală	Nici o franjă
				Verticală	Franje*) verticale distanţate cu $f_y = \frac{p}{\varepsilon_x}$
2	Întindere după direcţia Oy		$\varepsilon_x = 0$ $\varepsilon_y \neq 0$ $\gamma_{xy} = 0$	Orizontală	Franje orizontale, distanţate cu $f_x = \frac{p}{\varepsilon_y}$
				Verticală	Nici o franjă

Scanned with OKEN Scanner

3	Întindere după direcţiile Ox şi Oy**)		$\varepsilon_x \neq 0$ $\varepsilon_y \neq 0$ $\gamma_{xy} = 0$	Orizontală	Franje orizontale (liniile continui) distanţate cu $f_x = \frac{p}{\varepsilon_y}$
				Verticală	Franje verticale (liniile întrerupte), distanţate cu $f_y = \frac{p}{\varepsilon_x}$
4	Stare plană de solicitare (cazul general)**		$\varepsilon_x \neq 0$ $\varepsilon_y \neq 0$ $\gamma_{xx} \neq 0$	Orizontală	Franjele $v(x, y)$ — liniile continui — distanţate la $f_x = \frac{p}{\varepsilon_x}$
				Verticală	Franjele $u(x, y)$ — liniile întrerupte — distanţate la $f_y = \frac{p}{\varepsilon_x}$

* p este pasul reţelei imprimate şi al reţelei martor.
** Pe model este imprimată o reţea în cruce, cu pasul p, având direcţiile principale Ox şi Oy.

Scanned with OKEN Scanner

5.2.2. DETERMINAREA DEFORMAȚIILOR SPECIFICE CU AJUTORUL FRANJELOR MOIRÉ

Se consideră cazul unui model bidimensional — raportat la sistemul de axe xOy cuprins în planul modelului — supus unei stări plane de solicitare. Pentru a se putea determina deformațiile specifice liniare și unghiulare, în diferitele puncte ale modelului, este necesar să se imprime pe suprafața acestuia două rețele formate din linii paralele (se recomandă ca unghiul dintre cele două rețele să fie de 90° — rețea în cruce). Rețeaua martor (RM) se recomandă să fie o rețea simplă, care se suprapune peste rețeaua deformată (RD) de două ori, cu liniile paralele față de cele două direcții principale ale rețelei RD (care coincid cu Ox și Oy). În felul acesta se obțin următoarele avantaje:

— se exclude interpătrunderea celor două familii de franje ce apar în cazul cînd rețeaua RM ar fi și ea formată din două rețele;

— se evită rotunjirea franjelor moiré în punctele de intersecție ale acestora;

— se obține o mai mare flexibilitate la utilizarea rețelelor cu pasuri diferite, ceea ce permite realizarea unor rețele de franje cu o densitate și lățime optimă, mărind astfel precizia metodei.

De subliniat că suprapunerea succesivă a rețelei martor — cu linii drepte — peste rețeaua încrucișată deformată trebuie făcută cu deosebită atenție avînd grijă ca cele două poziții ale rețelei RM să fie precis orientate, conform marcajelor de orientare, trasate inițial, în lungul axelor principale ale rețelei RD. În caz contrar, valoarea lunecării specifice γ_{xy} măsurată este sensibil influențată. În schimb micile abateri de la ortogonalitate dintre cele două rețele nu influențează asupra valorii deformațiilor specifice liniare ε_x și ε_y, deși aceste abateri pot modifica sensibil forma franjelor.

În cazul cînd modelul de cercetat are o formă neregulată și se cere ca deformația unghiulară să fie măsurată cu precizie, se recomandă ca rețeaua imprimată pe model să fie formată din trei fascicule, două ortogonale și al treilea înclinat. Modelul deformat cu trei suprapuneri consecutive ale rețelei martor va furniza componentele perpendiculare ale deplasărilor u, v și w în direcțiile principale ale rețelei triaxiale, imprimată pe model.

Este indicat ca rețeaua a treia, formată tot din linii drepte, echidistante, să fie orientată la 45° față de direcțiile principale ale rețelei în cruce.

La același rezultat se ajunge dacă peste rețeaua deformată se suprapune o rețea martor cu pasul $p' = \frac{p}{\sqrt{2}}$, orientată la 45° față de direcțiile principale ale rețelei imprimate pe model (axele Ox și Oy). În acest caz apare o a treia familie de franje moiré a căror interpretare ne dă $\varepsilon_{45°}$. În felul acesta se obțin trei direcții de măsurare a deformațiilor, ansamblul comportîndu-se ca o infinitate de rozete, formate din traductori rezistivi, cu ajutorul cărora se poate măsura starea de deformație în fiecare punct al modelului [49], [54].

Scanned with OKEN Scanner

În cazul a trei rețele imprimate pe model, situate la 45°, componentele deformațiilor ε_x, ε_y și γ_{xy} sînt [97]:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_u\,; \quad \varepsilon_y = \varepsilon_v \quad \text{și} \quad \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{45°} - (\varepsilon_u + \varepsilon_v). \tag{5.20}$$

5.2.3. STABILIREA SEMNULUI DEFORMAȚIILOR SPECIFICE

Franjele moiré formate de două rețele de același pas, pentru o deformație ε_x aplicată modelului (rețeaua RD), vor urma direcția deplasării unghiulare a rețelei RM dacă deformația este de întindere (+) sau se vor deplasa în sens contrar, dacă deformația ε_x este de compresiune (—) (fig. 5.6)

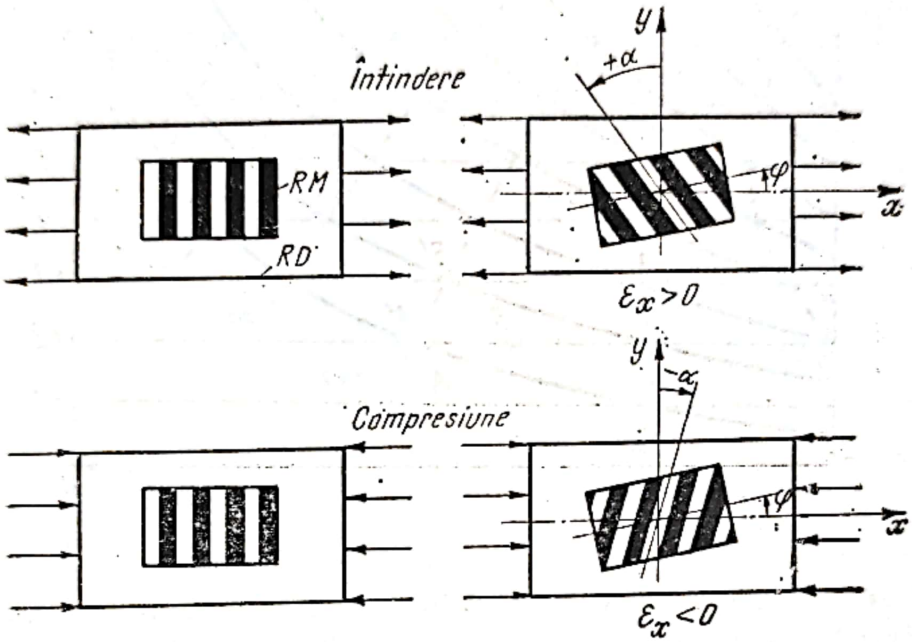


Fig. 5.6.

5.2.4. LEGĂTURA DINTRE FRANJELE MOIRÉ ȘI LINIILE DE NIVEL

Această regulă este utilizată frecvent la stabilirea semnului deformațiilor individuale într-un cîmp de deformații oarecare.

Se presupune că rețeaua imprimată, după deformarea modelului ce face obiectul cercetării, capătă o formă oarecare ($k_2 + 1$, $k_2 + 2$, ..., $k_2 + n$) și că rețeaua martor este formată din linii paralele, echidistante așa cum se prezintă în fig. 5.7. Deoarece franjele moiré se obțin prin unirea punctelor de intersecție ale celor două rețele, pentru ca un punct al rețelei deformate să se găsească pe o franjă el trebuie să parcurgă o distanță a cărei proiecție după axa Oy trebuie să fie egală cu un număr întreg de pasuri ($p_1, 2p_1, \ldots, np_1$). Presupunînd că un punct A de pe linia de indice $k_1 + 1$, a ajuns după deformare în A' pe franja de indice $m + 1$, iar un punct B al liniei de indice $k_1 + 2$ a ajuns după deformare în B', pe aceeași franjă, se observă că toate punctele care vor parcurge pe direcția perpendiculară la liniile rețelei martor distanța p_1 se vor găsi pe aceeași franjă de indice $m+1$, iar punctele care vor parcurge o deplasare pe verticală egală cu $2p_1$ vor fi situate pe franja moiré de indice $m + 2$ ș.a.m.d.

Deci se poate trage concluzia că franjele moiré sînt locuri de egală deplasare a punctelor pe direcţie perpendiculară la liniile reţelei martor, asemenea curbelor de nivel ale unei hărţi geografice care reprezintă variaţiile de altitudine în diferite puncte ale terenului. Această proprietate a franjelor este utilizată în studiul deformaţiilor şi a tensiunilor.

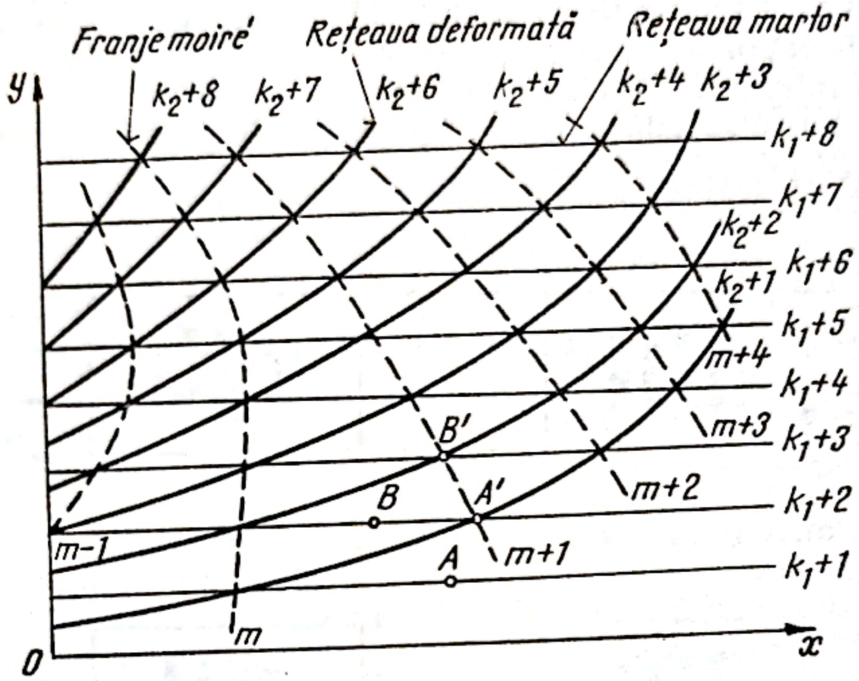


Fig. 5.7.

Dacă se utilizează o reţea martor formată din linii paralele la axa Oy şi o reţea imprimată identică, franjele rezultate după deformarea modelului vor fi curbe de nivel ale funcţiei $u(x, y)$. Similar, cu reţeaua martor paralelă la axa Ox, suprapusă peste liniile, iniţial orizontale, ale reţelei imprimate, se obţin franje care sînt curbe de nivel ale funcţiei $v(x, y)$.

Aplicaţii. 1°. *Cazul unei bare solicitate axial.* Pentru început se consideră cazul cel mai simplu al unei platbande supuse la deformaţii uniforme de tracţiune după direcţia axei Ox, pe care se trasează o reţea de linii dispuse perpendicular pe direcţia de solicitare (poziţiile 1 şi 2 din tabelul 5.2).

În fig. 5.8, a este prezentată schema producerii franjelor moiré în cazul solicitării de întindere, iar în fig. 5.8b se dă fotografia franjelor.

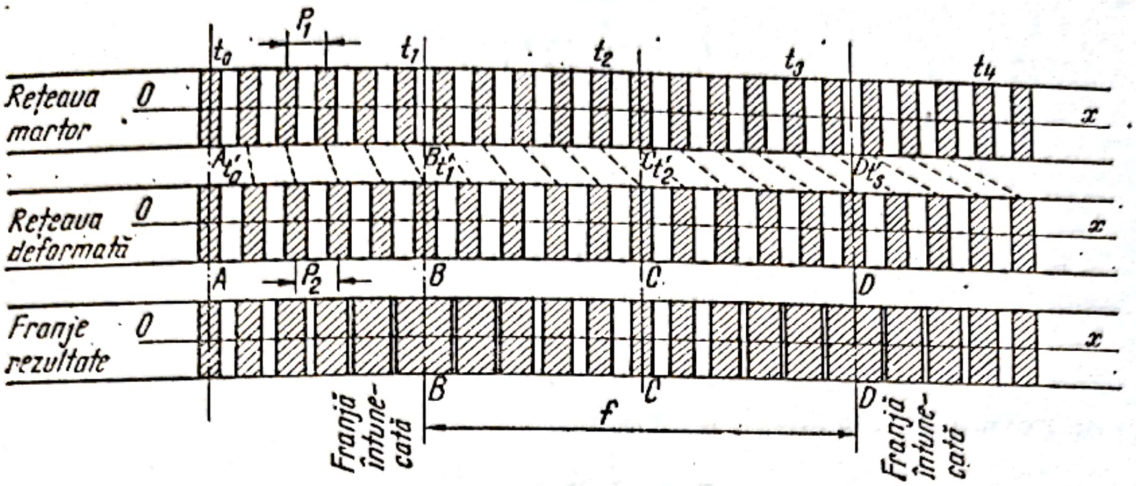
În secţiunile B şi D s-au format franje întunecate, iar în secţiunile A şi C franje luminoase. Franjele sînt paralele cu liniile reţelei RD. Interfanja în acest caz, este dată de relaţia:

$$f = \frac{1}{\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2(x)}} \tag{5.25}$$

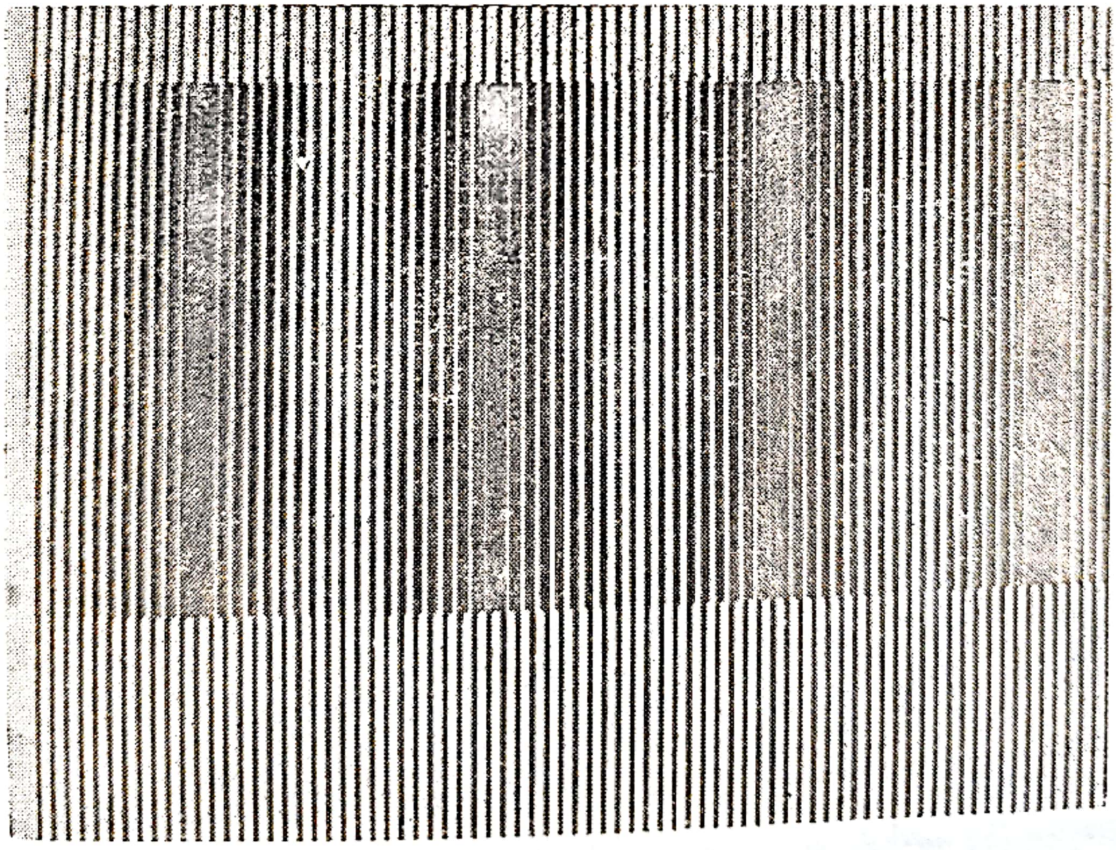
În cazul solicitării de întindere a modelului

$$p_2(x) = p_1(1 + \varepsilon_x) \text{ şi } p_1 = p$$

Scanned with OKEN Scanner


P_1
t_0
t_1
t_2
t_3
t_4
Rețeaua martor
O
x
A'_0
B'_{t_1}
C'_{t_2}
D'_{t_3}
Rețeaua deformată
O
x
A
P_2
B
C
D
Franje rezultate
O
x
B
C
D
f
Franjă întunecată
Franjă întunecată

a



b

Fig. 5.8.

deci

$$f = \frac{1}{\frac{1}{p} - \frac{1}{p(1+\varepsilon_x)}}$$

sau

$$f = \frac{(1+\varepsilon_x)\,p}{\varepsilon}. \tag{5.22}$$

Din relaţia (5.22) se poate calcula valoarea deformaţiei specifice ε_x în funcţie de pasul reţelei martor şi de valoarea interfranjei

$$\varepsilon_x = \frac{p}{f_s - p}. \tag{5.23}$$

Sau dacă se neglijează p faţă de f, rezultă

$$\varepsilon_x = \frac{p}{f}. \tag{5.24}$$

Se observă că franjele moiré reprezintă liniile de egală deplasare a punctelor pe direcţie perpendiculară la reţeaua imprimată pe model, în cazul analizat mai sus, linii de u.

2°. *Cazul unei bare solicitate la încovoiere pură (fig. 5.9).* Dacă pe faţa laterală a barei se imprimă o reţea de linii paralele, echidistante, perpendiculare la axa barei, după solicitarea barei de momentul M, vor rezulta linii radiale echiunghiulare.

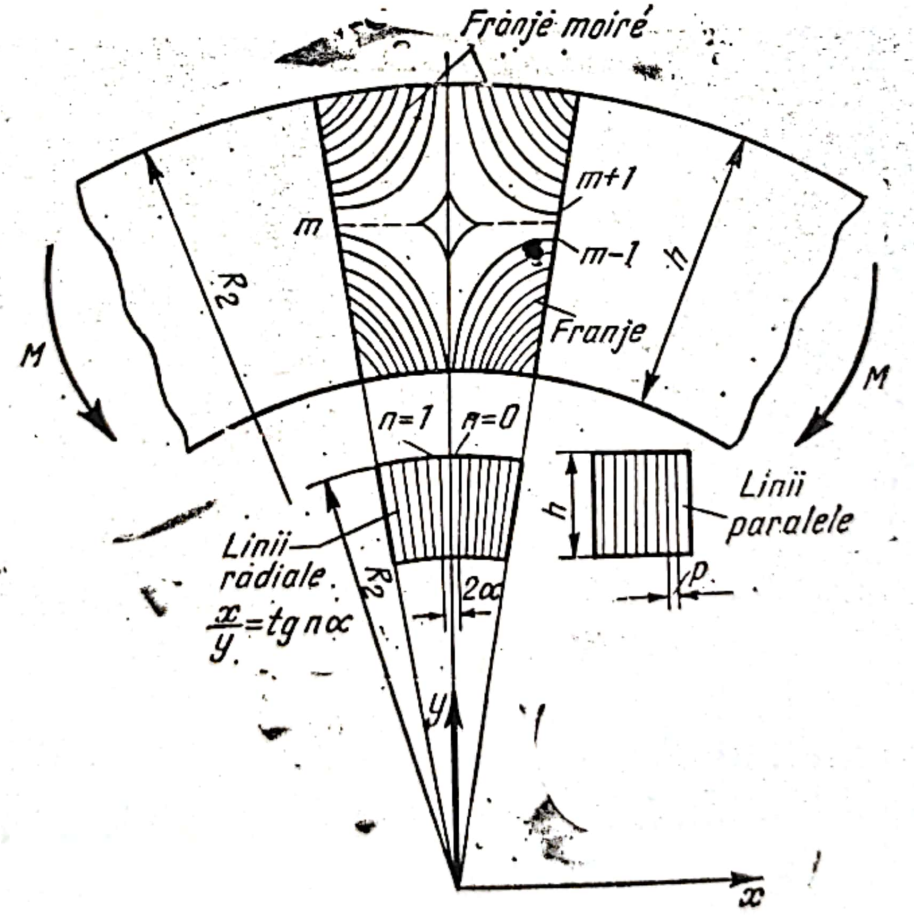


Fig. 5.9.

Prin suprapunerea imaginii reţelei martor peste reţeaua deformată se vor obţine franjele moiré care sînt formate din două familii de hiperbole. În fig. 5.9 este schiţată familia franjelor,

Scanned with OKEN Scanner

rezultate prin suprapunerea celei de-a doua rețele, care reprezintă curbe de egală deplasare după direcția Ox (linii de nivel $u(x, y)$).

5.2.5. DETERMINAREA DEFORMAȚIILOR SPECIFICE PRIN DERIVAREA GRAFICĂ

Se consideră cazul general al unei probe supuse la o stare plană de solicitare, pentru care au fost puse în evidență franjele moiré rezultate prin suprapunerea rețelei martor peste rețeaua imprimată pe model, formată, inițial, din linii echidistante paralele la Ox (fig. 5.10).

S-a arătat (§. 5.2.4) că franjele moiré, formate ca mai sus, sînt linii de nivel ale funcției $u\ (x, y)$. Cu alte cuinte, pentru o franjă de ordinul n,

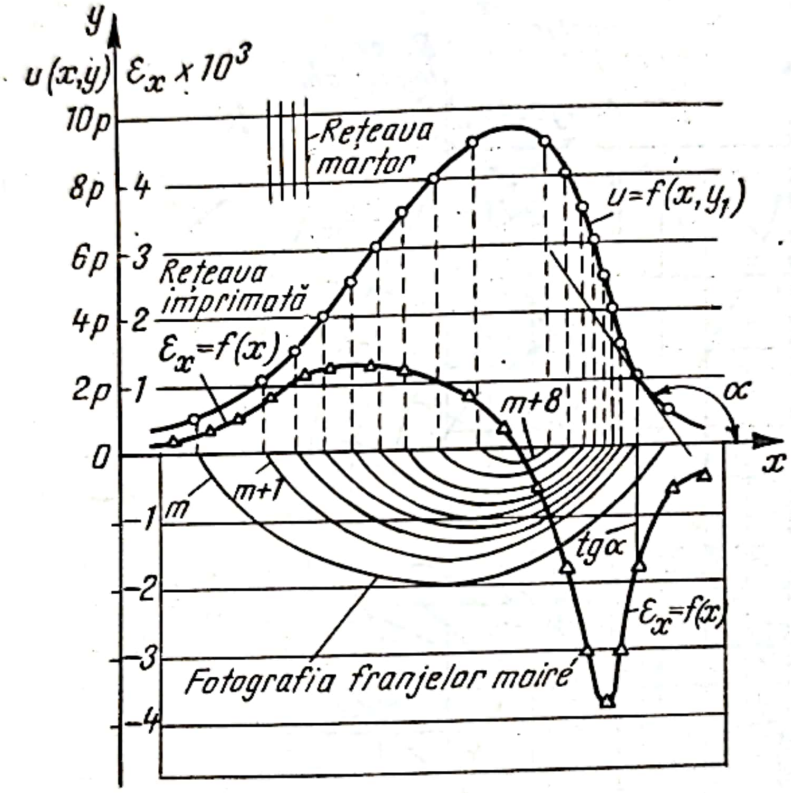


Fig. 5.10.

corespunzînd unei deplasări $u = np$, fiecare punct al franjei reprezintă un punct de pe proba deformată, deplasat din poziția sa inițială cu o distanță — după direcția principală a rețelei — egală cu u.

Dacă se secționează suprafața fictivă, definită mai sus, printr-un plan perpendicular pe planul rețelei martor și paralel cu Ox, (care în fig. 5.10 coincide cu Ox), se obțin prin rabatere curbele de variație a deplasării u pentru o valoare y_1 constantă (în fig. 5.10 $y_1 = 0$).

Trecerea de la o franjă la alta corespunde unei deplasări egale cu pasul rețelei p, care este reprezentat la o scară stabilită pe abscisă, respectiv pe ordonată.

Determinînd grafic tangenta, în diferite puncte ale curbei $u=f(x,y_1)$, se obțin valorile $\frac{\partial u}{\partial x}$ și deci curba $\varepsilon_x = f(x)$ pentru y = constant.

Dacă se repetă aceeaşi operaţie cu o reţea martor paralelă la axa Ox franjele moiré reprezintă liniile de nivel ale deplasării $v = f(x_1, y)$ şi cu ajutorul tangentelor $\frac{\partial u}{\partial x}$ se poate construi curba $\varepsilon_y = f(x)$, pentru $x =$ constant.

În fig. 5.11 se prezintă cazul unei probe plane, avînd o formă oarecare, ce se găseşte sub acţiunea unor sarcini ce lucrează în planul modelului. Deoarece tensorul deformaţiilor, are o direcţie oarecare (în planul modelului, este necesar ca pe model să se imprime o reţea în cruce avînd axele

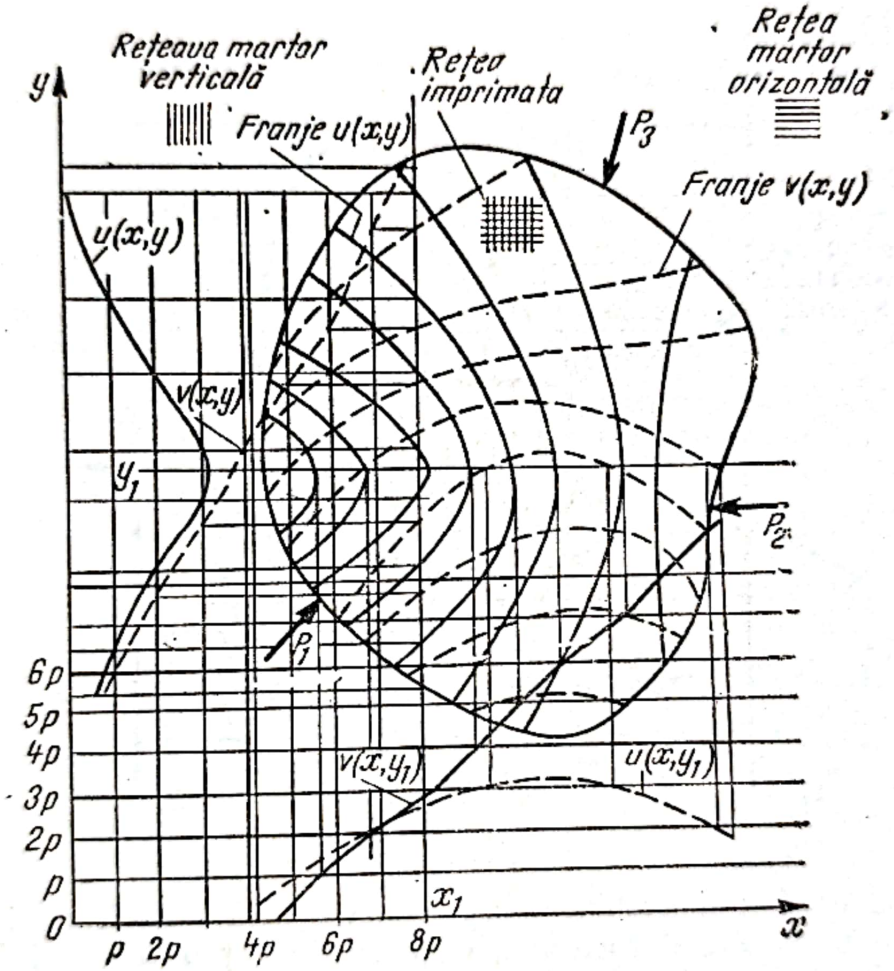


Fig. 5.11.

principale paralele cu Ox şi Oy. Cu ajutorul unei reţele martor simple avînd acelaşi pas cu reţeaua imprimată, aşa cum s-a văzut în cazul precedent, se pun în evidenţă două familii de franje moiré, după direcţiile Ox şi Oy, care reprezintă linii de nivel ale componentelor deplasării după cele două direcţii. Ele corespund, aşa cum s-a arătat, funcţiilor $u(x, y)$ (curbele continue) şi $v(x, y)$ (curbele întrerupte). În fig. 5.11 sînt trasate, pentru $x = x_1$ şi $y = y_1$, curbele : $u(x_1, y)$ şi $v(x, y_1)$ şi curbele $u(x, y_1)$ şi $v(x_1, y)$ [61].

Dacă se derivează grafic cele patru curbe (ca în fig. 5.10) se obţin de-a lungul dreptelor $x = x_1$ şi $y = y_1$ coeficienţii $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$; $\frac{\partial u}{\partial y}$ şi $\frac{\partial v}{\partial y}$, care dau valorile componentelor deformaţiile specifice.

Intersectînd suprafaţa probei cu un număr corespunzător de drepte, paralele la Ox şi Oy, se pot determina, astfel, deformaţiile specifice şi deci valoarea tensiunilor din punctele dorite.

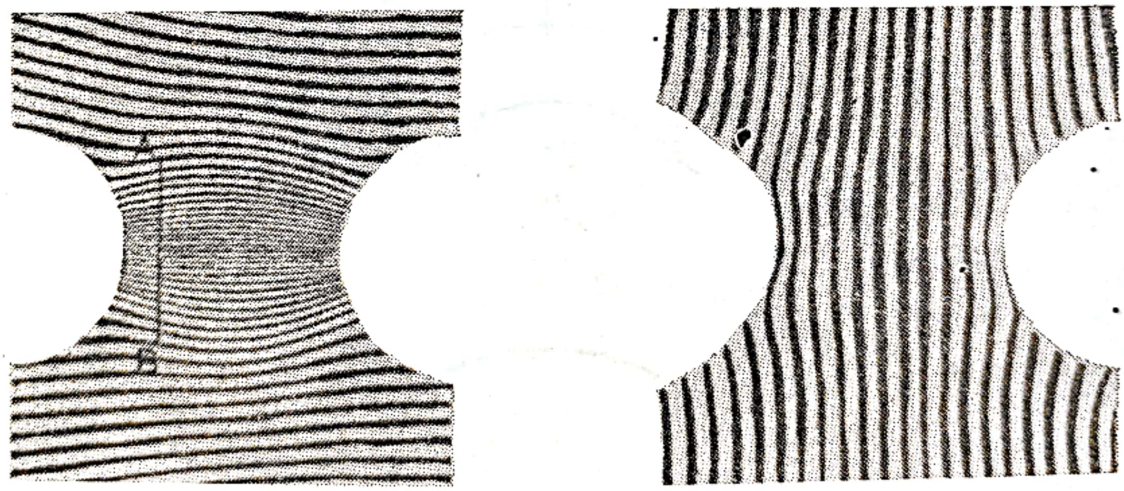
Măsurarea, cu suficientă precizie, a deformaţiilor, necesită familii de franje moiré puţin distanţate (cu valoarea mică a interfranjei), în lungul cărora componentele deformaţiilor să fie evaluate, pe cît posibil, la unghiuri apropiate de 90°.

În cazul deformaţiilor mari aceste condiţii pot fi îndeplinite utilizînd pentru reţeaua imprimată (RD) şi pentru reţeaua martor (RM) reţele identice, aşa cum s-a arătat mai sus.

Aplicaţii. 1°. În fig. 5.12 se prezintă franjele moiré ale cîmpurilor deplasărilor u (fig. 5.12, a) şi v (fig. 5.12, b) pentru un model din aluminiu cu perforări simetrice semicirculare de rază r, solicitată axial la întindere [97].

Curbele $u = f_1(x)$ şi $v = f_2(x)$ din lungul segmentului $A - B$, prezentate în fig. 5.13, a sînt deduse din franjele moiré prezentate în figura precedentă. În fig. 5.13 b sînt trasate, prin derivare grafică, curbele $\frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_x$ (curba a); $\frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_y$ (curba b); $\frac{\partial u}{\partial y} = \gamma_{yy}$ (curba c) şi $\frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{xx}$ (curba d).

Pentru o trasare mai precisă a curbelor derivate (curbele a, b, c şi d din fig. 5.13, b) este foarte importantă să fie construite cu cît mai mare exactitate, curbele deplasărilor (fig. 5.13, a).



a Fig. 5.12. *b*

Aceasta se poate realiza, în primul rînd, dacă se dispune de o reţea de franje cu frecvenţă cît mai mare.

Observaţie. O frecvenţă limită care poate asigura o bună reproducere fotografică a unei reţele prin copiere pe suprafaţa modelului este aceea cu circa 40 linii pe mm. Dacă reproducerea reţelei se face pe bază de proiecţie, această limită trebuie redusă la jumătate. În urma cercetărilor efectuate

Scanned with OKEN Scanner

de Theocaris [97] s-a ajuns la concluzia că o sporire a dimensiunilor modelului supus cercetării are ca rezultat o sporire a sensibilității metodei.

2°. În fig. 5.14 se prezintă dimensiunile și schema de încărcare a unui element curb, realizat din policlorură de vinilin, fabricată în țara

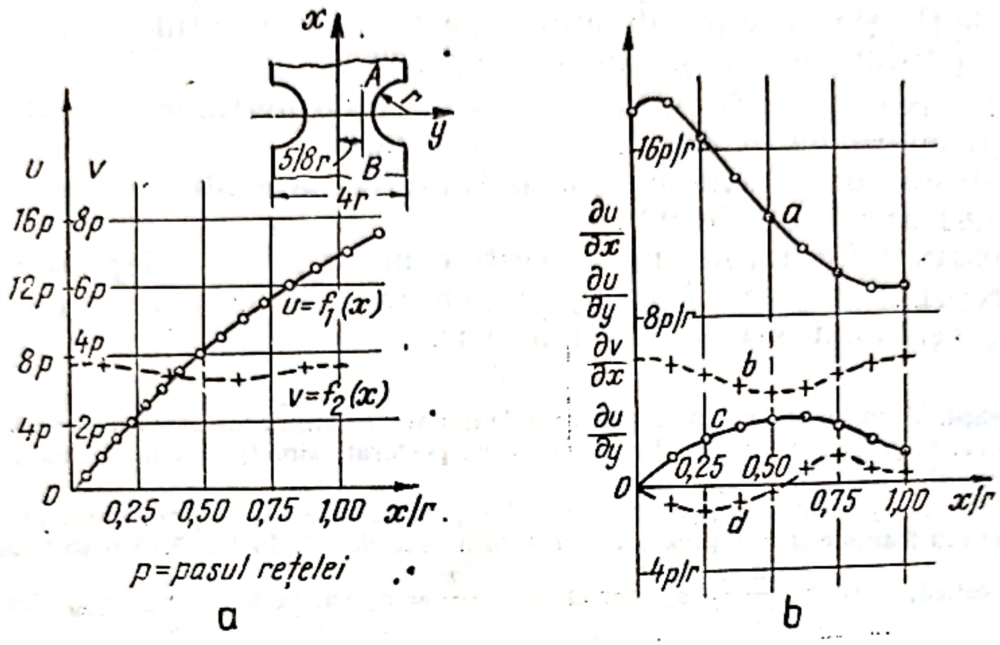


Fig. 5.13.

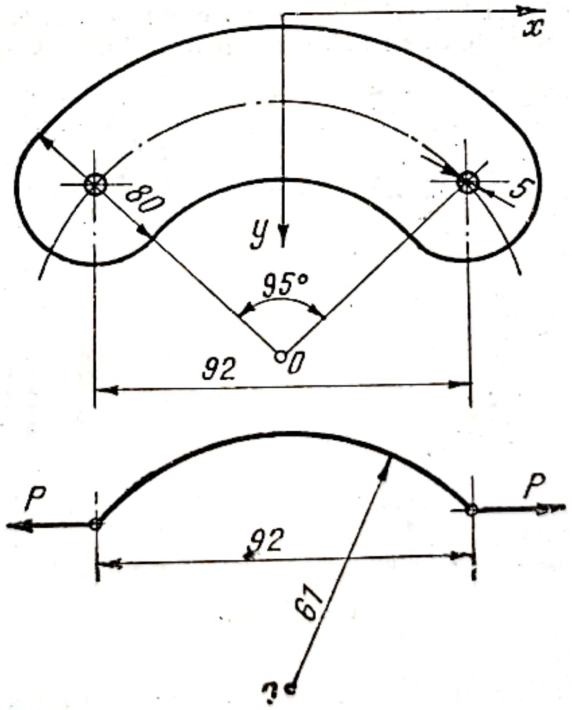


Fig. 5.14.

noastră, a cărui stare de deformație a fost studiată, utilizînd franjele moiré, în laboratorul catedrei de rezistența materialelor de la Institutul politehnic din Iași [89], [92].

Pe o față a modelului a fost imprimată, pe cale fotografică, o rețea cu frecvența de 5 linii pe mm ($p = 0{,}2$ mm). În fig. 5.15 se prezintă, prin axele lor, franjele moiré rezultate din suprapunerea, în poziție verticală, a rețelei martor de același pas. Modelul a fost solicitat de sarcina $P = 10$daN.

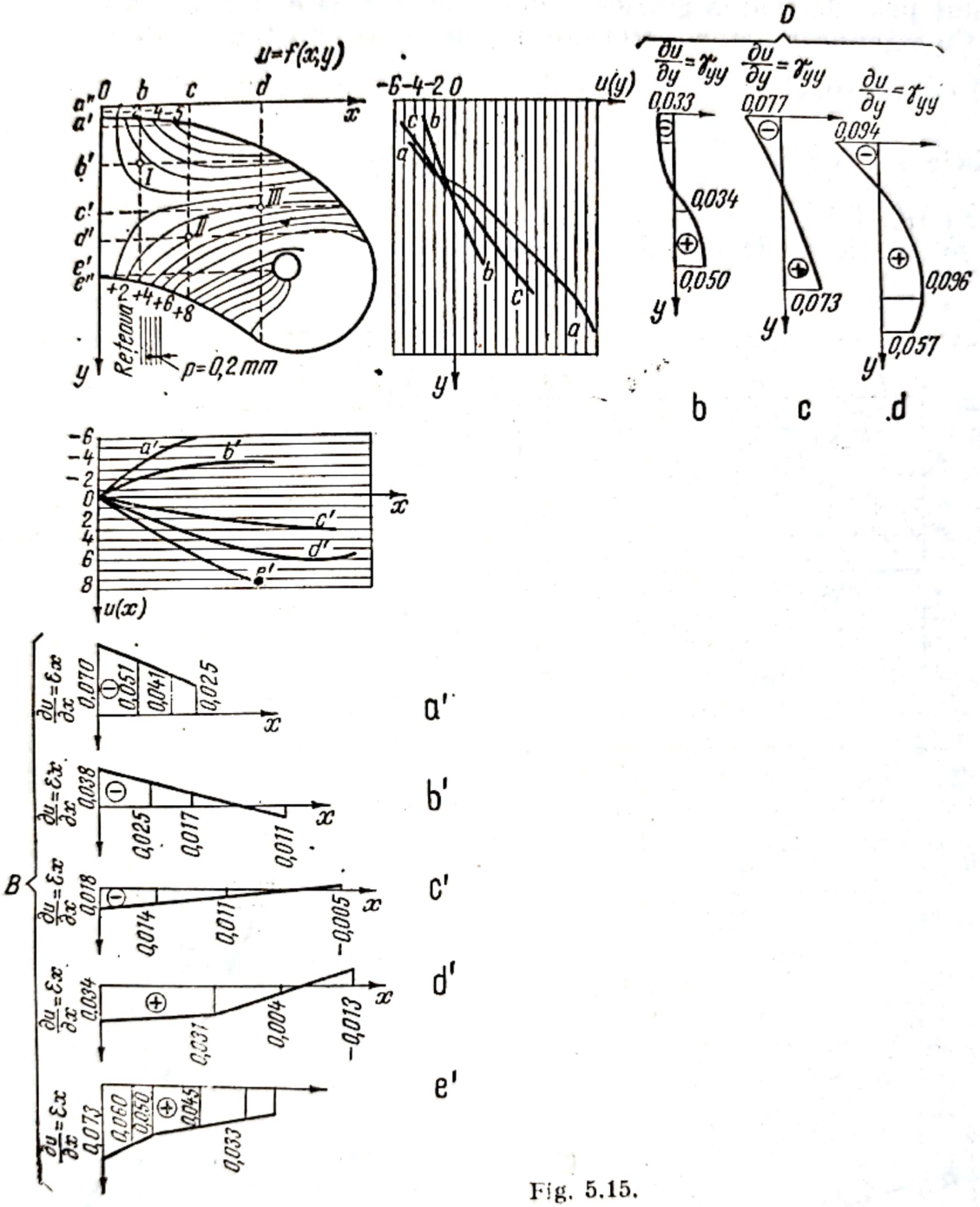


Fig. 5.15.

Făcînd diverse secțiuni, paralele cu axa Ox (secțiunile a', b', c' d' și e') s-au obținut curbele deplasărilor $u = f(x, y_1)$ adică isoteticele*) (curbele a', b', c' d' și e'; fig. 5.15, A); prin derivarea grafică a acestora s-au obținut

*) Isoteticele sînt locurile geometrice ale punctelor de egală valoare a componentei deplasării după o anumită direcție.

valorile deformaţiilor specifice $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$ (fig. 5.15, B). Componenta deformaţiei specifice unghiulare $\gamma_{yy} = \frac{\partial u}{\partial y}$ (diagramele D din fig. 5.15) s-a obţinut prin derivarea grafică a curbelor b' c' şi d' din fig. 5.15, C.

Cu reţeaua martor orizontală se obţine o altă familie de franje (fig. 5.16) cu ajutorul cărora, în mod similar, se obţin valorile lui $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$ (curbele B) şi $\gamma_{xx} = \frac{\partial v}{\partial x}$ (curbele D, fig. 5.16).

În fig. 5.17 se arată variaţia lungirii specifice ε_x în secţiunea cea mai solicitată a elementului (secţiunea Oy).

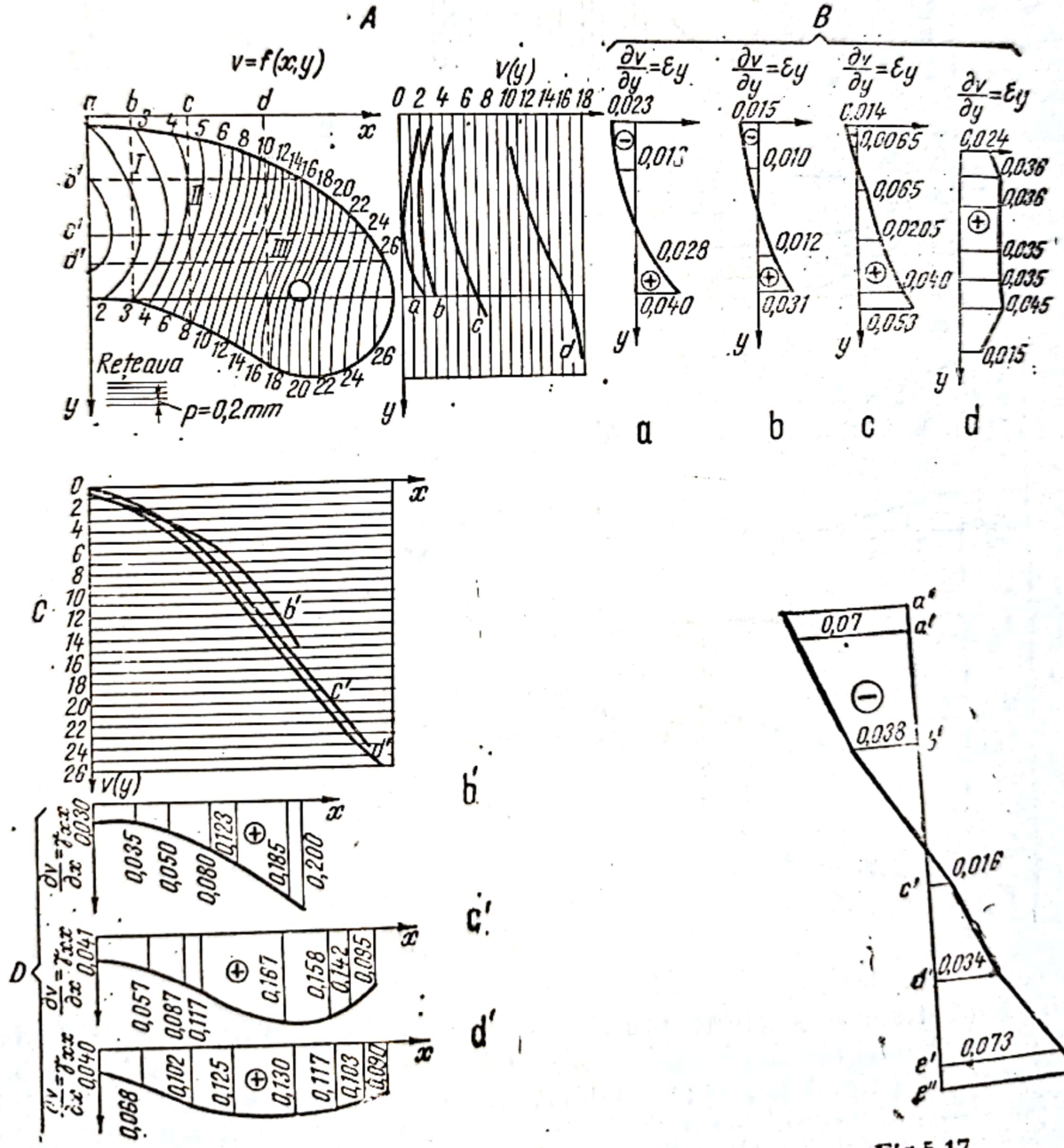


Fig. 5.16.

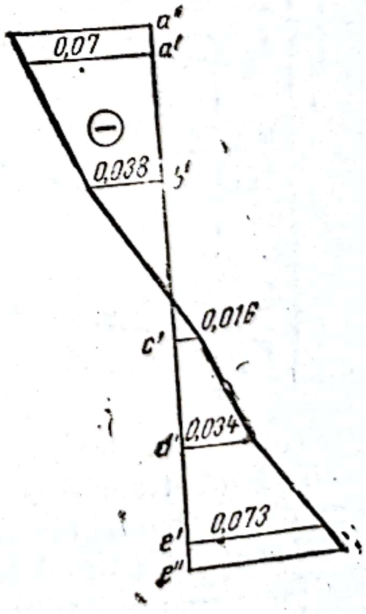


Fig.5.17.

3°. Laboratorul Central pentru Poduri și Șosele din Paris a fost acela care a utilizat pentru prima dată, pe scară semi-industrială, tensometria bazată pe fenomenul moiré [28]. Aici s-a studiat, cu ajutorul franjelor moiré, distribuția tensiunilor, într-o îmbinare cu buloane.

Platbandele îmbinate au fost realizate dintr-un aliaj de aluminiu, cu modulul de elasticitate $E = 7\,500$ daN/cm².

Pe fața exterioară a unei platbande a fost imprimată o rețea cu 16 linii pe mm, perpendiculară pe direcția solicitării. Rețeaua martor a avut același pas și aceeași orientare a liniilor.

În fig. 5.18, a se prezintă franjele moiré obținute prin suprapunerea rețelei martor peste rețeaua imprimată, îmbinarea fiind solicitată la sarcina $P = 29 \cdot 10^4$ N, care, în secțiunea platbandei din dreptul primului rînd de buloane, a produs o tensiune apropiată de limita de elasticitate a materialului. Prin derivări grafice au fost stabilite componentele deformațiilor specifice, cu ajutorul cărora au fost calculate tensiunile a căror distribuție, în diferite secțiuni ale platbandei, este prezentată în fig. 5.18, b.

Paralel, în cîteva puncte, au fost măsurate deformațiile și cu ajutorul unui tensometru mecanic de tip Huggenberger și s-au comparat rezultatele cu cele obținute cu ajutorul franjelor moiré. Diferența medie constatată între valorile deformațiilor determinate prin cele două metode, pentru același punct, a fost de ordinul $\varepsilon = \pm 6{,}6\ 10^{-5}$ la care corespunde o tensiune, $\sigma = \pm 0{,}5$ daN/mm².

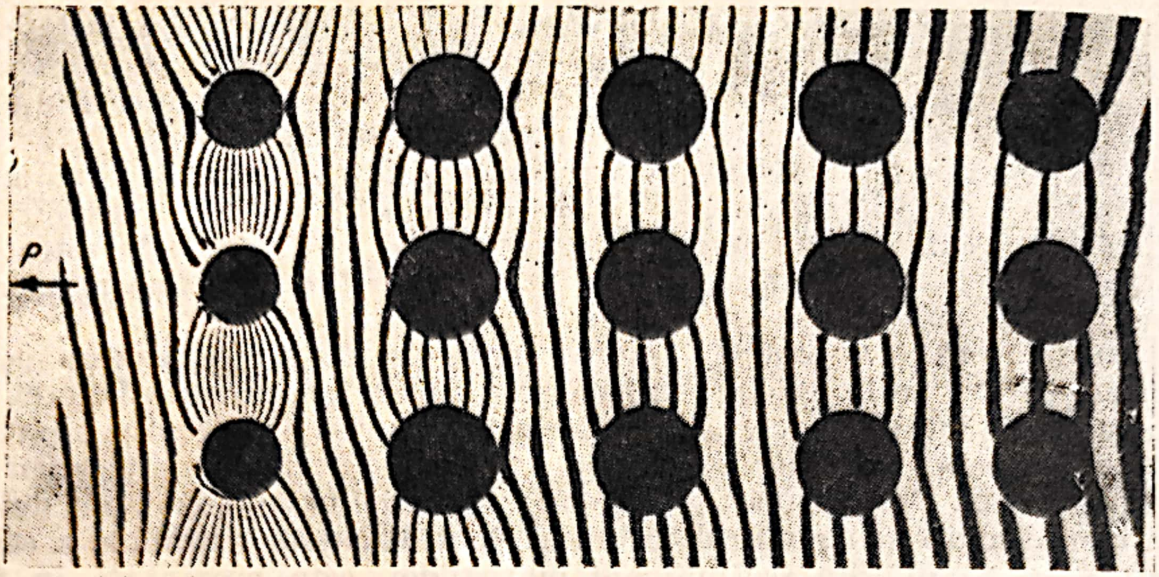
Cu toate că s-a lucrat cu rețele cu pas relativ mare $\left(p = \frac{1}{10}\ \text{mm}\right)$ precizia rezultatelor poate fi considerată bună; aceasta, datorită, în primul rînd, faptului că aliajul din care au fost confecționate elementele îmbinate are un modul de elasticitate foarte mic, de 23 ori mai mic decît al oțelului. În cazul cînd platbandele ar fi fost realizate din oțel pentru a se obține rezultatele cu aceeași precizie ar fi trebuit să se utilizeze rețele cu pasul $p = \frac{1}{16 \times 23} = \frac{1}{370}$ mm, practic greu de realizat.

5.2.6. ALEGEREA TIPURILOR DE REȚELE ÎN CAZUL CÎMPURILOR DE DEFORMAȚIE VARIABILE

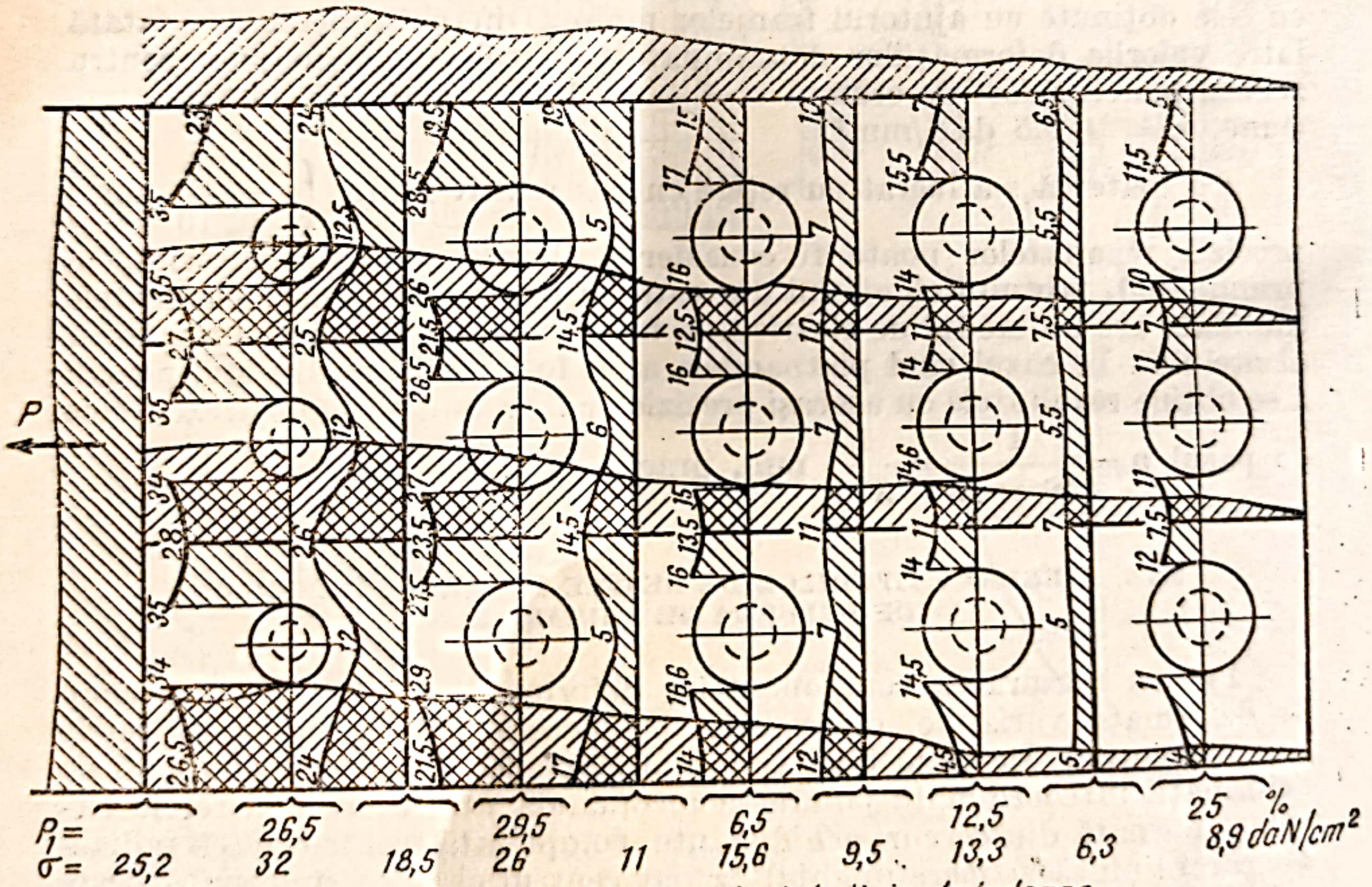
Pentru măsurarea componentelor deformațiilor în cazul unui cîmp de deformații variabile, de regulă, sînt necesare două tipuri de rețele complementare. În cazul cînd este mai comodă exprimarea cîmpului de deformații în coordonate polare se recomandă utilizarea unei rețele circulare formată din cercuri echidistante, completată printr-o rețea radială ale cărei linii să acopere unghiul 2π, iar centrul ei să se suprapună peste cel al rețeli circulare.

Cu ajutorul acestei perechi de rețele pot fi determinate, cu suficientă precizie, componetele polare ale deformației; în plus, rețelele nefiind sensibile la rotiri rigide ale modelului, ele pot fi utilizate la determinarea elipsei deformațiilor și a direcțiilor principale ale cîmpului de deformație.

Scanned with OKEN Scanner



a



P_1 = Procentul din sarcina totală preluat de linia de buloane

σ = Tensiunea medie în secțiunea platbandei

b

Fig. 5.18.

În unele cazuri la măsurarea componentelor deformaţiilor este indicat să se utilizeze drept reţea imprimată o reţea circulară şi ca reţea martor o reţea cu linii drepte. Prin orientarea reţelelor de referinţă în aşa fel încît să formeze o reţea încrucişată sub un unghi de 90°, 60° sau 45°, acestea vor putea forma, împreună cu reţeaua circulară, o rozetă în formă de dreptunghi, triunghi echilateral sau de tip T — delta (tabelul 5.1)

5.2.7. UTILIZAREA REŢELELOR CU PAS DIFERENŢIAT

Măsurarea deformaţiilor, deci şi a tensiunilor, cu ajutorul franjelor moiré, se poate realiza cu atît mai precis cu cît reţelele utilizate sînt mai dese. Pe de altă parte, reperarea axelor franjelor depinde, în primul rînd, de calitatea fotometrică a franjelor care este influenţată negativ de creşterea frecvenţei reţelei. Deci pentru a putea efectua măsurători cît mai precise, este indicat să se utilizeze reţele cu frecvenţă cît mai mare şi, în acelaşi timp, să se obţină franje cît mai fine.

De cele mai multe ori este dificil ca aceste două condiţii să fie îndeplinite simultan, deoarece, în general, cu cît reţeaua de franje este mai deasă, deci interfranjele sînt mai mici, cu atît obţinerea unor fotografii de calitate a franjelor este mai greu de realizat. Din acest considerent se recomandă ca valoarea interfranjei să fie cuprinsă între 2 şi 10 mm.

În cazul reţelelor de acelaşi pas, interfranja, pentru un anumit pas, depinde numai de lungirea specifică suferită de model în regiunea respectivă (relaţia (5.22)).

Dacă, de exemplu, se utilizează o reţea cu frecvenţa de 40 linii/mm $\left(p = \frac{1}{40}\text{mm}\right)$ pentru $\varepsilon = 2.10^{-3}$ (care corespunde în cazul oţelului la $\sigma = 4200$ daN/cm²), distanţa dintre franje este $f = \frac{p}{\varepsilon} = \frac{1}{40 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} =$ $= 12$ mm. Pe o zonă a probei de 40 — 50 mm lăţime nu se dispune decît de maximum 4 franje, adică 4 — 5 puncte pentru trasarea unei curbe de deplasare (u sau v), prin derivarea cărora se obţin valorile deformaţiilor specifice, ceea ce în general este insuficient.

În consecinţă, în cazurile cînd urmează să fie cercetate elemente de construcţie cu deformaţii elastice mici, nu se recomandă utilizarea reţelelor cu pasuri egale, deoarece se produc familii de franje rare, neadecvate pentru analiza stării de deformaţie, mai ales, în cazul regiunilor cu concentratori puternici de tensiuni.

În asemenea cazuri este indicată utilizarea reţelelor cu *pas diferenţiat*. Primul care a utilizat asemenea reţele, la analiza deformaţiilor elastice, a fost *M. Diruy* de la Laboratorul Central de Poduri şi Sosele din Paris [22]. Dezvoltarea teoriei acestei metode şi utilizarea largă a ei în rezolvarea

Scanned with OKEN Scanner

unor probleme de elasticitate, plasticitate şi vîsco-elasticitate au fost făcute de P. Theocaris şi colaboratorii săi [96], [97].

Utilizarea reţelelor cu pas diferenţiat pentru obţinerea franjelor moiré este prezentată în lucrarea [58] ca una din principalele mijloace pentru ridicarea sensibilităţii metodelor tensometrice bazate pe fenomenul moiré.

Metoda se bazează pe utilizarea unei reţele martor cu pas diferit de pasul reţelei imprimate pe model. Reţelele martor cu pas mai mic sînt indicate în cazul solicitării de întindere, în timp ce reţelele martor cu pas mai mare decît reţeaua imprimată sînt indicate în cazul solicitărilor de compresiune. Prin utilizarea unei reţele RM cu un pas puţin diferit de acela al reţelei RD lucrurile se petrec ca şi cînd s-ar introduce o deformaţie iniţială fictivă, din care cauză se vor produce franje moiré mai dese şi mai contrastante.

Se consideră p pasul reţei imprimate RD şi $p\,(1+\lambda)$ pasul reţelei RM, unde λ are valori foarte mici (pozitive în cazul deformaţiilor de compresiune şi negative în cazul deformaţiilor de întindere). Sporirea valorii lui λ va cauza o descreştere a interfranjei, în cazul cînd se ţine seamă de indicaţia de mai sus. Dacă la creşterea lui λ se observă o creştere a valorii interfranjei înseamnă că semnul deformaţiei nu este cel considerat iniţial. Cînd densitatea franjelor moiré devine nesatisfăcătoare, pentru precizia evaluării deformaţiilor, se recomandă schimbarea reţelei RM cu alta care să aibă un pas corespunzător.

La alegerea lui λ trebuie să se ţină seamă, nu numai de felul deformaţiilor, ci şi de gradientul lor. În cazul unui gradient mare se cere utilizarea unei reţele martor cu pas diferenţiat, cu λ astfel ales încît franjele să fie suficient de dese pentru a se putea asigura o stabilire fidelă a variaţiei deformaţiilor în zona respectivă.

Posibilitatea varierii diferenţei de pas prin procurarea unei serii de reţele martor, cu diferite valori pentru λ oferă un avantaj în plus acestei metode larg utilizată.

Se consideră că pe o probă se imprimă o reţea cu pasul p. Înainte de deformarea modelului (solicitat axial), după suprapunerea reţelei martor de pas $(p+\lambda)$ apar franje moiré iniţiale rectilinii şi echidistante. Dacă se consideră, de exemplu, pentru reţeaua verticală, interfranja iniţială f (produsă de diferenţa de pas λ), după deformarea epruvetei acesta devine f'.

Raportul dintre pasurile celor două reţele şi valoarea interfranjei, dacă se neglijează λ^2, sînt [56]

$$\frac{p}{p'}=\frac{1}{1+\lambda}\approx 1-\lambda,$$

$$f=p\frac{1+\lambda}{\lambda}. \tag{5.25}$$

Scanned with OKEN Scanner

Deci dacă în zona corespunzătoare interfranjei f — cuprinsă între două franje succesive — apare o deformaţie specifică ε_x, interfranja devine $f' = f + \Delta f$.

În lucrarea [56] se demonstrează că :

$$\Delta f = \frac{p\,\varepsilon_x}{\lambda(\lambda - \varepsilon_x)}. \tag{5.26}$$

Creşterea relativă a interfranjei este

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{p \cdot \varepsilon_x}{\lambda(\lambda - \varepsilon_x)} \cdot \frac{\lambda}{p\,(1 + \lambda)} \approx \frac{\varepsilon}{\lambda - \varepsilon}. \tag{5.27}$$

Dacă se înlocuieşte valoarea lui λ din relaţia (5.25) în relaţia (5.27) rezultă

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\varepsilon_x f}{p - f\,\varepsilon_x}$$

sau

$$\Delta f = \frac{\varepsilon_x f^2}{p - f\,\varepsilon_x}. \tag{5.28}$$

Valoarea lui λ trebuie aleasă — aşa cum s-a arătat — în funcţie de mărimea şi gradientul deformaţiilor măsurate. În unele cazuri, în aceeaşi zonă este indicat să se utilizeze două reţele martor cu pas diferit, una pentru poziţia verticală (franje de u) şi alta pentru poziţia orizontală (franje de v). Pentru a stabili dacă într-o anumită regiune modelul este solicitat la întindere sau la compresiune se roteşte uşor reţeaua martor peste reţeaua imprimată, aşa cum s-a arătat în fig. 5.6. Acelaşi procedeu se foloseşte şi pentru a determina semnul lui λ în cazul reţelei martor cu pas diferenţiat, dacă acesta nu este cunoscut (vezi lucrarea [98]).

Raportul dintre pasurile celor două reţele $\frac{p}{p_1}$ este echivalent cu o deplasare fictivă $u_f = -\lambda_x x$ şi deci deplasarea totală U, determinată cu ajutorul franjelor moiré, este

$$U = u + u_f = u - \lambda_x x. \tag{5.29}$$

Componenta ε_x a deformaţiei specifice se determină prin derivarea relaţiei (5.29), adică

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x} + \lambda_x. \tag{5.30}$$

Scanned with OKEN Scanner

Similar, pentru direcţia Oy, componenta deformaţiei specifice este dată de relaţia

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y} + \lambda_y \qquad (5.31)$$

unde λ_x şi λ_y sînt diferenţele de pas dintre reţelele martor şi reţelele imprimate, după direcţiile principale, considerate paralele cu axele Ox şi Oy.

Dacă $\frac{\partial U}{\partial x} = 0$, rezultă $\varepsilon_x = \lambda_x$. Deci, în punctele unde tangenta la franjele moiré este paralelă la axa Ox (fig. 5.19), componenta lungirii specifice, după această axă, este egală cu diferenţa λ_x dintre pasul reţelei martor şi cel al reţelei imprimate (după axa Ox). Astfel se poate stabili locul geometric al punctelor pentru care $\varepsilon_x = \lambda_x$, respectiv, $\varepsilon_y = \lambda_y$.

Variind pe λ, adică dispunînd de o serie de reţele martor ale căror pasuri diferă cu λ, se pot trasa nişte curbe în lungul cărora tangentele la franjele moiré sînt paralele cu axele principale Ox şi Oy ale modelului.

Deci, pentru evaluarea componentelor deformaţiilor cu ajutorul reţelelor cu pas diferenţiat se trasează curbele corespunzătoare deplasă-

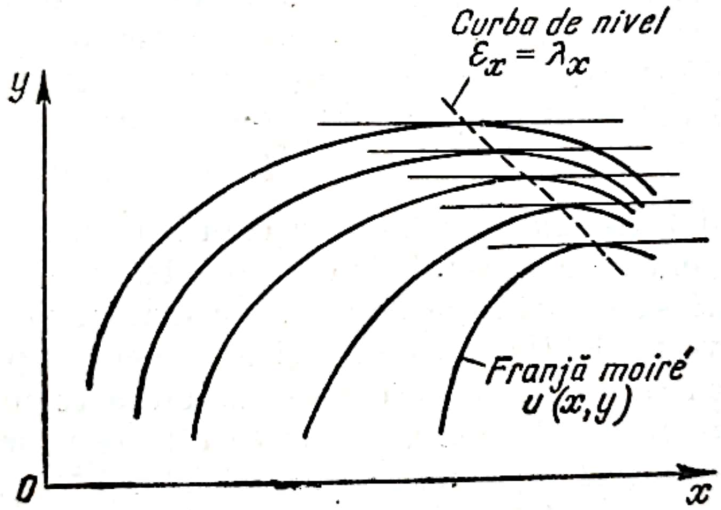


Fig. 5.19.

rilor totale, la care se adună algebric cantităţile λ_x sau λ_y, evaluate cu ajutorul franjelor înregistrate la modelul nesolicitat.

În cazul cînd cele două reţele nu au suferit vreo rotaţie în cursul suprapunerii reţelei martor pe suprafaţa modelului, componentele lunecării specifice γ_{xx} şi γ_{yy} nu sînt influenţate de către deformaţiile liniare.

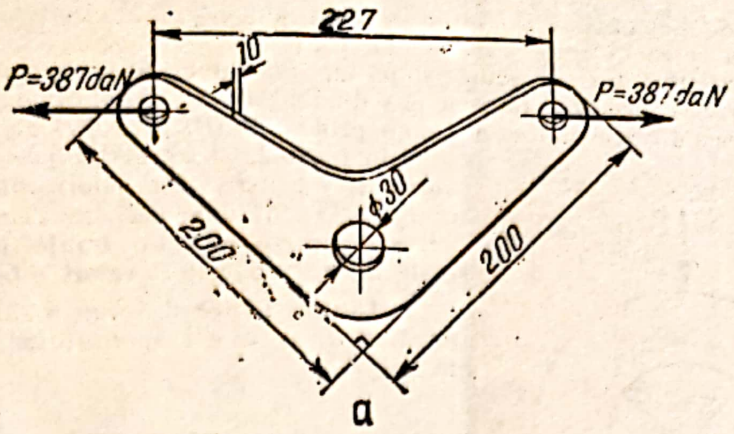
Aplicaţii. 1°. În fig. 5.20 sînt arătate franjele moiré obţinute în cazul unui echer din plexiglas solicitat în domeniul plastic de o forţă $P = 387$ daN (fig. 5.20, a). Reţeaua imprimată a avut 16 linii/mm ($p = 0{,}0625$ mm), iar cele două reţele martor utilizate au avut pasurile diferenţiate şi anume:

— reţeaua verticală p_v = p.0,9925 (λ negativ (fig. 5.20, b))

— reţeaua orizontală p_h = p.1,030 λ (pozitiv) (fig. 5.20, c)).

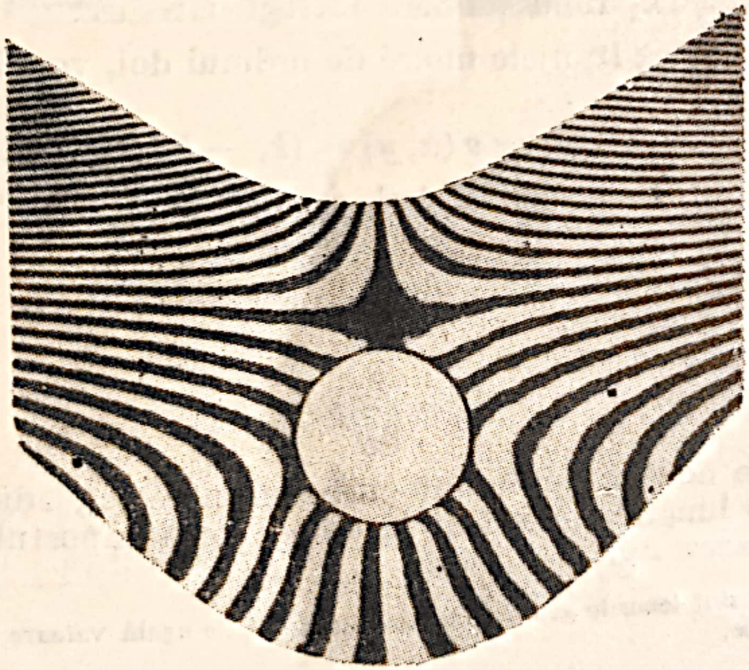
2°. Theocaris [97] a aplicat această metodă la studiul deformaţiilor şi al tensiunilor în cazul unui inel confecţionat dintr-o placă de polimer epoxi pur, de 6,4 mm grosime, cu

Scanned with OKEN Scanner



a

b



c

Fig. 5.20.

diametrul exterior de 42 mm, iar cel interior de 21 mm. (fig. 5.21) Pe una din fețele inelului a fost imprimată o rețea în cruce cu 500 linii pe țol.

Inelul a fost solicitat la compresiune după una din direcțiile principale ale rețelei imprimate. Rețeaua martor utilizată a fost cu pas diferențiat și s-a aplicat astfel pe model încît liniile ei să aibă aceeași direcție cu una din axele principale (Ox sau Oy) ale rețelei imprimate.

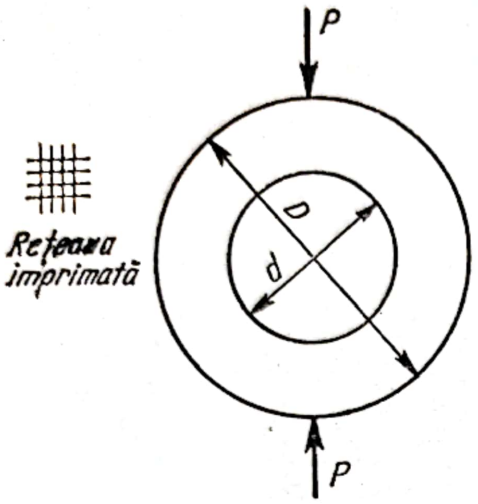


Fig. 5.21.

În fig. 5.22 se arată franjele moiré ale deplasărilor u și v pentru trei valori diferite ale lui λ, iar în fig. 5.23 sînt date curbele *isoenteice* *). ε_x și ε_y derivate dintr-o serie de franje moiré obținute cu rețele martor cu cele 3 valori diferite pentru λ.

Liniile negre din fig. 5.22 reprezinta curbele isotetice *u* și *v* corespunzătoare celor trei valori ale lui λ.

5.2.8 UTILIZAREA FRANJELOR MOIRÉ DE ORDINUL DOI

Se consideră două clișee ale aceleași familii de franje moiré obținute, de exemplu, cu o rețea martor orizontală. Se consideră, de asemenea, că franjele sînt dese, adică modelul a suferit o deformație mare și că pasul rețelelor utilizate este relativ mic (fig. 5.24). Dacă se suprapun cele două clișee și se dă o translație verticală, foarte mică, Δy, unui clișeu, se obține o nouă familie de franje moiré, denumită *moiré de ordinul 2*, sau *moiré de moiré* [13], [24].

Știind că fiecare din franjele moiré reprezintă locul punctelor de pe model ale căror deplasări diferă cu un multiplu al pasului rețelei, se poate scrie

$$v(x, y) = k_1 p,$$
$$v(x, y + \Delta y) = k_2 p,$$

k_1 și k_2 fiind numere întregi oarecare.

Noile franje, adică franjele moiré de ordinul doi, vor fi definite prin relația:

$$v(x, y + \Delta y) - v(x, y) = (k_1 - k_2)p = kp. \tag{5.32}$$

Dacă se neglijează termenul Δy^2, rezultă

$$\Delta y \frac{\partial y}{\partial v} = kp$$

sau

$$\varepsilon_y = \frac{k}{\Delta y} p. \tag{5.33}$$

Deci curbele noului moiré sînt curbe de nivel ε_y, adică între două franje succesive lungirea specifică ε_y diferă prin raportul dintre pasul rețelei și deplasarea Δy.

*) Isoenteticele sînt locurile geometrice ale punctelor de egală valoare a componentelor deformațiilor specifice.

Scanned with OKEN Scanner

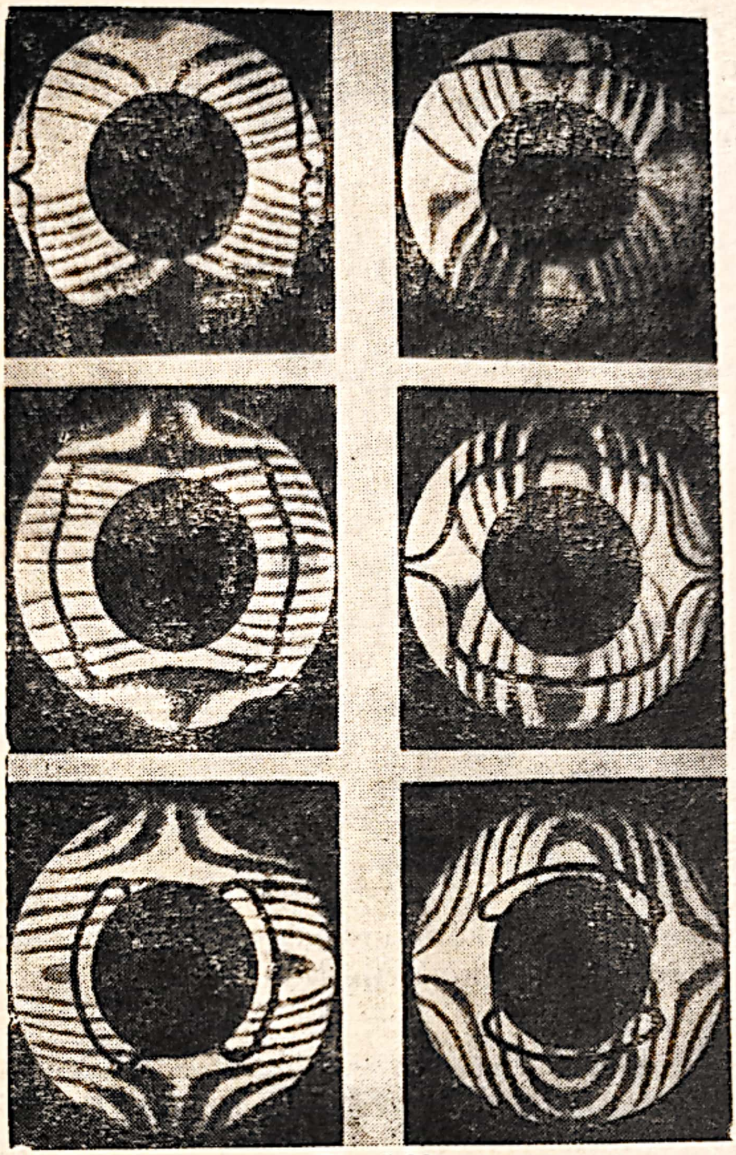


Fig. 5.22.

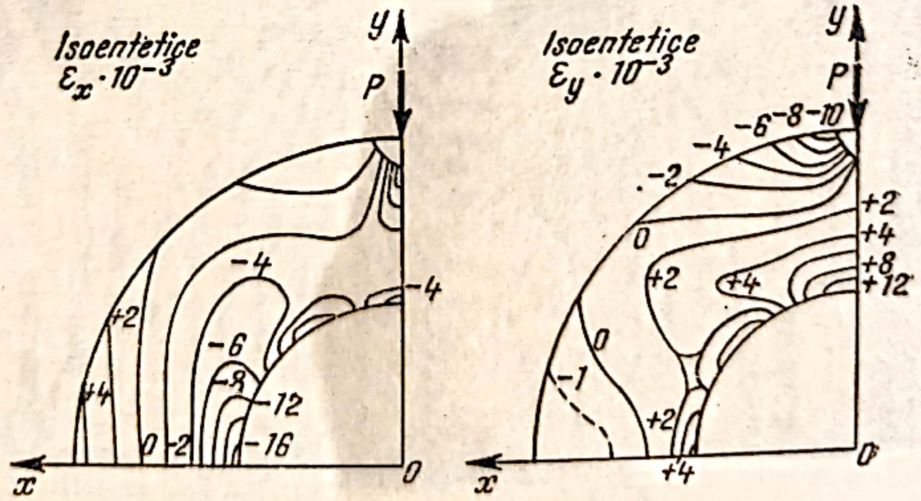


Fig. 5.23.

În mod analog pot fi determinate și curbele de nivel:

— ε_x, prin translația franjelor moiré de $u\,(x, y)$ după direcția Ox;
— γ_{xx}, prin translația franjelor de $v\,(x, y)$ în direcția Ox;
— γ_{yy} prin translația franjelor de $u\,(x, y)$ în direcția Oy.

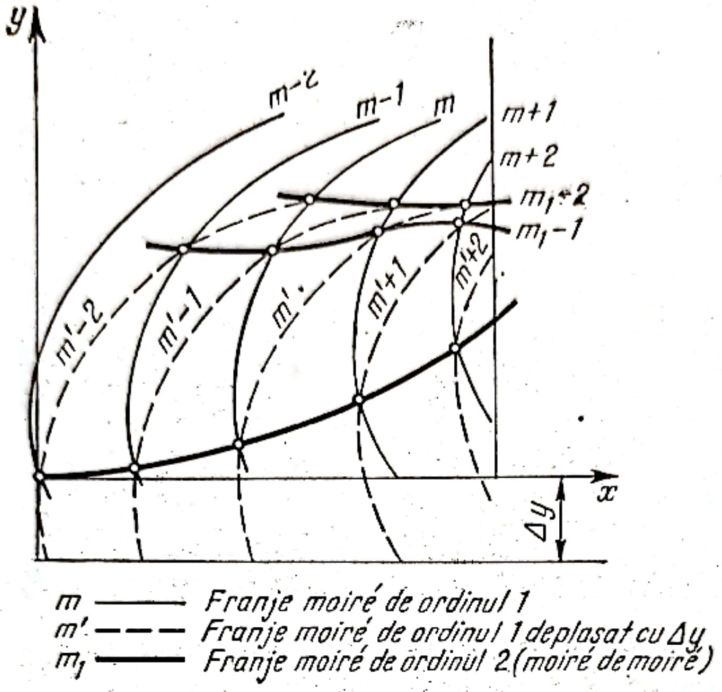


Fig. 5.24.

Utilizarea acestei metode la determinarea deformațiilor este indicată numai în cazul deformațiilor importante și cu utilizarea unor rețele cu frecvență mare.

Aplicație. În fig. 5.25 se prezintă franjele de ordinul doi pentru o grindă de araldit solicitată la încovoiere în domeniul plastic. Rețelele utilizate au avut frecvența de 20 linii pe mm [13].

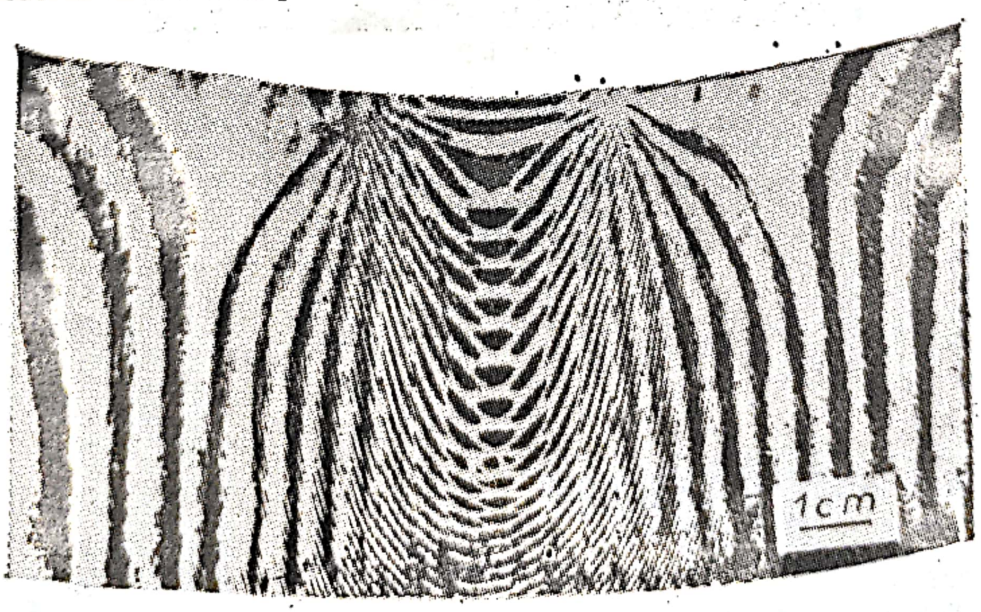


Fig. 5.25.

Scanned with OKEN Scanner

5,2.9. UTILIZAREA ABACELOR LA DETERMINAREA DEFORMAȚIILOR SPECIFICE

În lucrarea [62] se prezintă o metodă practică, care a fost dezvoltată ulterior de alți cercetători, pentru interpretarea franjelor moiré în vederea determinării valorilor deformațiilor specifice într-un punct oarecare al modelului.

Metoda se referă la franjele obținute cu rețele de linii drepte paralele, de același pas, și constă în utilizarea unor abace, cu ajutorul cărora deformațiile specifice liniare pot fi determinate direct. Astfel, prin măsurarea interfranjei f și a unghiului φ format de direcția franjei cu axa Ox, paralelă la liniile rețelei martor, se poate determina deformația specifică, în punctul ales O, după direcția perpendiculară la această axă (fig. 5.26). Dacă punctul O se consideră situat pe o franjă rezultată din suprapunerea rețelei martor

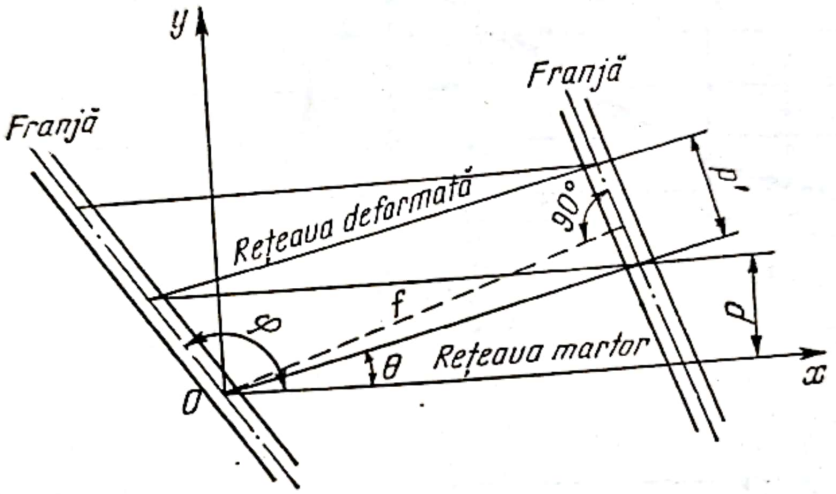


Fig. 5.26.

peste rețeaua deformată — care, inițial, avea același pas și aceeași orientare ca și rețeaua martor — pentru o zonă restrînsă a punctului O, ecuația franjei se poate considera bine definită, întrucît ambele rețele sînt date inițial de expresii analitice.

Deformația specifică, în punctul O, după direcția Oy, normală la rețeaua martor, are valoarea

$$\varepsilon_y = C_1 \frac{p}{f} \tag{5.34}$$

iar rotația θ, în punctul O, a rețelei deformate, se determină cu relația

$$\operatorname{tg}\ \theta = C_2 \frac{p}{f} \tag{5.35}$$

unde coeficientul C_1 este dat în abaca din fig. 5.27 iar coeficientul C_2 este dat în abaca din fig. 5.28 în funcție de unghiul φ și de raportul $\frac{p}{f}$ [57], [62].

Scanned with OKEN Scanner

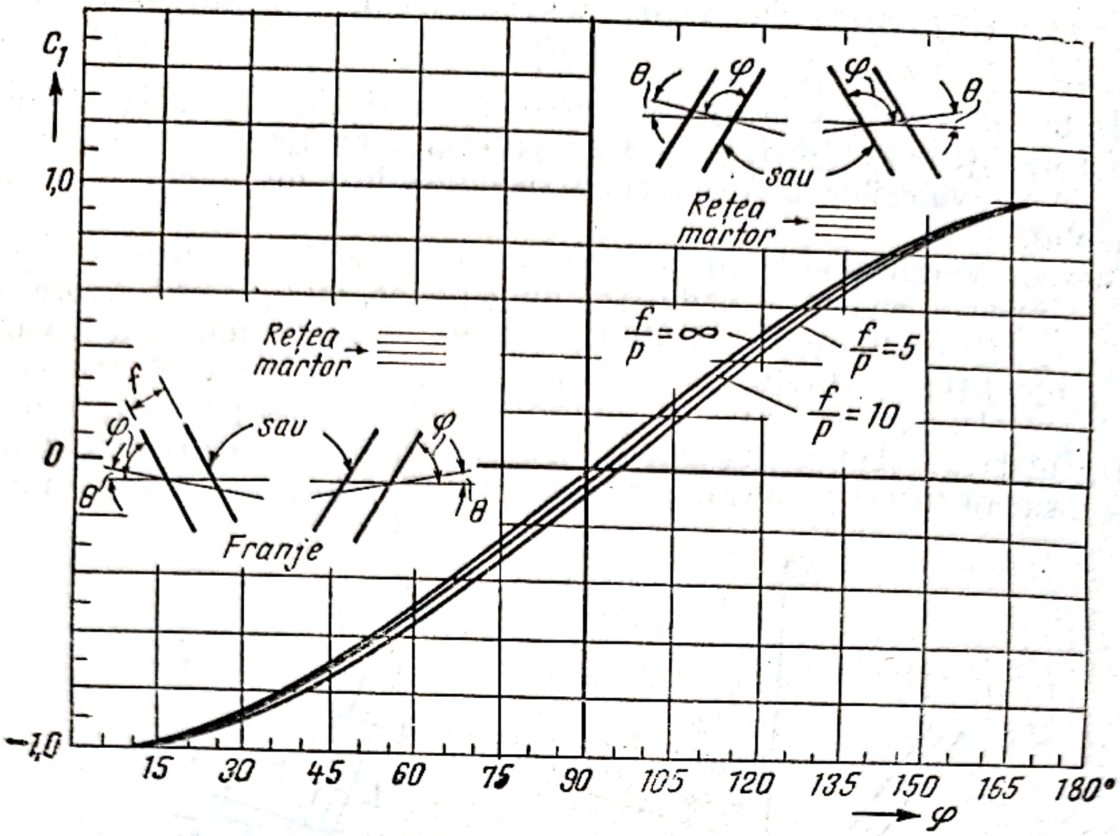


Fig. 5.27.

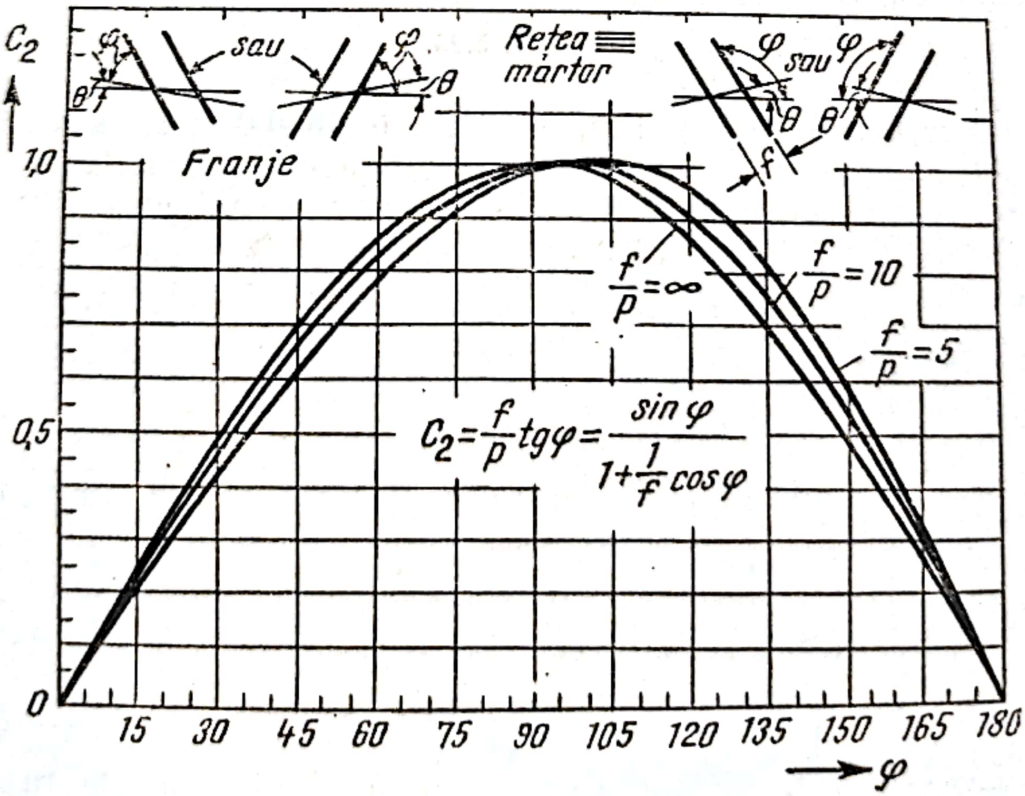


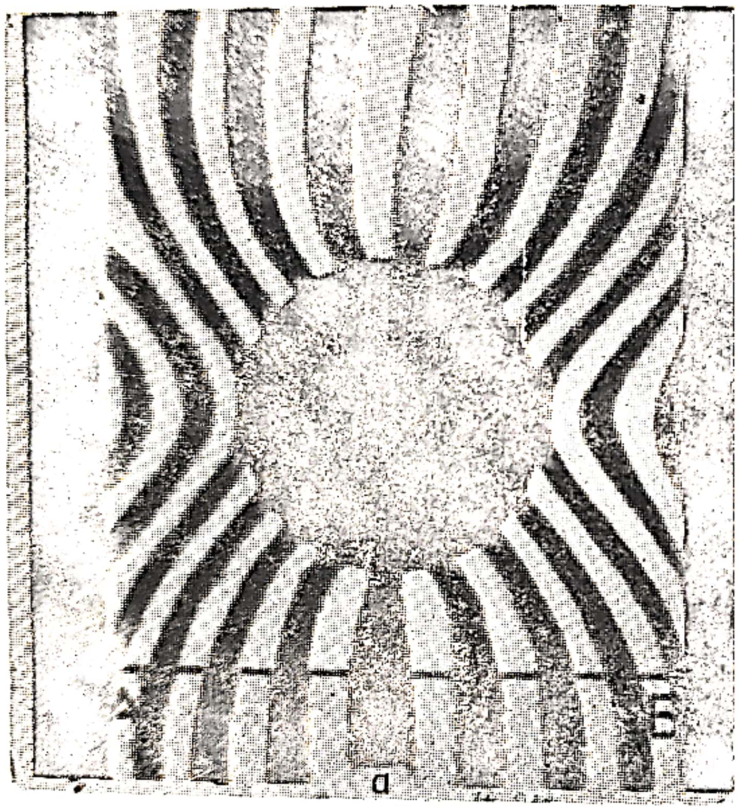
Fig. 5.28.

Dacă unghiul φ se apropie de 0° sau de 180°, din fig. 5.27 se observă că C_1 tinde către valorile -1 sau $+1$, deci în acest caz

$$\varepsilon_y = \pm \frac{p}{f}.$$

S-a ajuns la relaţia corespunzătoare solicitării de întindere, respectiv de compresiune simplă, cînd franjele sînt paralele şi echidistante (v. tabelul 5.2).

Aplicaţie. Se consideră [62] familia de franje moiré din fig. 5.29, a corespunzătoare deplasărilor transversale în cazul unei platbande din aliaj uşor $\left(E = 7500 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}\right)$ perforată cu o gaură circulară, solicitată la întindere axială. Atît reţeaua martor (cu liniile verticale) cît şi



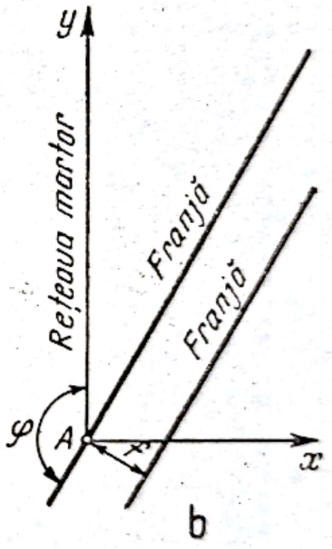


Fig. 5.29.

reţeaua imprimată, (iniţial tot verticală), au avut acelaşi pas şi anume $p = \frac{1}{20}$ mm.

Pentru punctul A situat pe axa primei franje întunecate din stînga secţiunii AB, $f =$ $= 2{,}8$ mm şi $\varphi = 148°$; $\frac{f}{p} = 2{,}8 \times 20 = 56$ (fig. 5.29, b).

Din fig. 52.7 pentru $\varphi = 148°$ rezultă $C_1 = 0{,}88$ şi din fig. 5.28 rezultă $C_2 = 0{,}55$; corespunzătoare punctului A din fig. 5.29. Deformaţia specifică după direcţia Ax, corespunzătoare acestui punct, este:

$$\varepsilon_x = 0{,}88 \frac{1}{56} = 1{,}88 \cdot 10^{-2}$$

$$\operatorname{tg}\theta = 0{,}55 \frac{1}{56} \approx 0{,}01.$$

Scanned with OKEN Scanner

5.2.10. DETERMINAREA DEFORMAȚIILOR SPECIFICE ÎN CAZUL TEMPERATURILOR ÎNALTE

Spre deosebire de metodele tensometrice clasice, tensometria bazată pe fenomenul moiré poate fi utilizată la determinarea deformațiilor și în cazul cînd temperatura elementelor de construcție ce fac obiectul cercetării au temperaturi ridicate (peste 600 °C).

Deoarece lacurile fotosensibile, cu ajutorul cărora se imprimă rețeaua pe model nu rezistă la temperaturi mai mari de 200—300 °C, în asemenea cazuri sînt utilizate rețele imprimate pe cale mecanică sau chimică (v. §. 5.3.1).

Aplicație. Dantu [18] a utilizat franjele moiré la determinarea deformațiilor produse de tensiunile remanente din îmbinările sudate.

În fig. 5.30 se prezintă franjele moiré obținute cu rețeaua martor verticală, în cazul a două plăci din aliaj de aluminiu — magneziu, cu dimensiunile de 200 × 100 × 7 mm, sudate în mediu de argon.

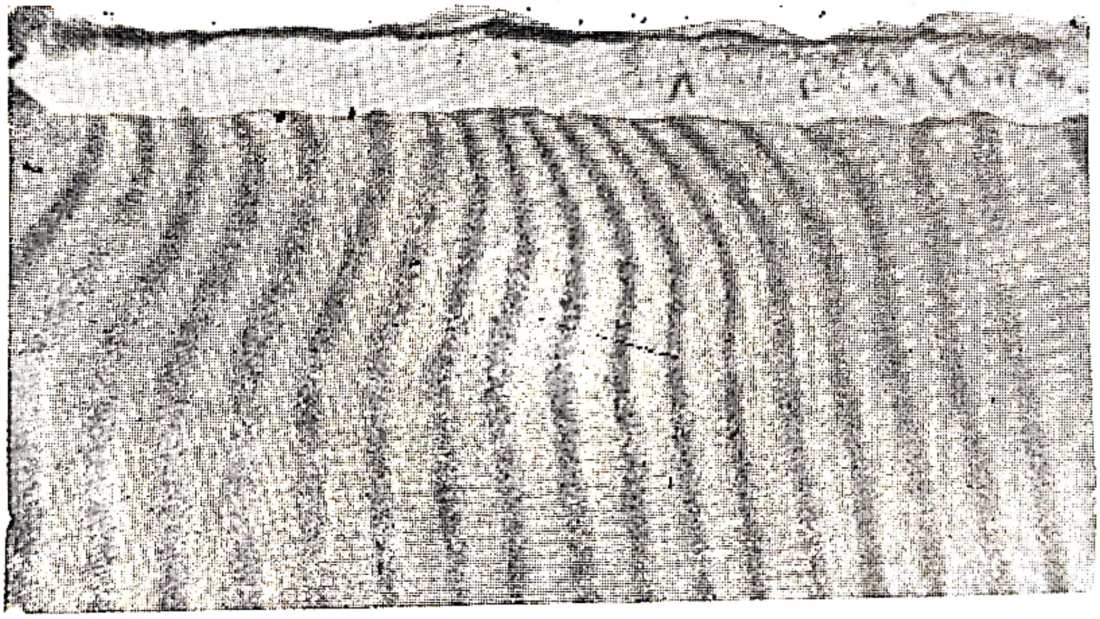


Fig. 5.30.

Pe una din plăci, înainte de sudare, a fost gravată, pe cale chimică, o rețea în cruce cu frecvența de 20 linii pe mm, avînd liniile paralele la laturile perpendiculare ale plăcii. Apoi s-a fotografiat rețeaua imprimară la o anumită scară.

În fig. 5.31 se prezintă fotografia unei porțiuni de rețea gravată, mărită de circa 100 de ori.

După efectuarea sudării și răcirea modelului la aceeași scară, s-a fotografiat din nou rețeaua imprimată.

Rețeaua martor cu pas diferențiat $p = 0{,}02(1 + 0{,}005)$, s-a suprapus întîi peste fotografiile rețelei gravate nedeformată, apoi peste fotografiile rețelei deformate (după sudare și răcire).

Rețeaua martor a fost orientată succesuv după cele două direcții ale rețelei gravate pe placă, ceea ce a permis punerea în evidență a două familii de franje $u(x, y)$ și $v(x, y)$ înainte de sudare și după sudare. Franjele au fost fotografiate și apoi au fost trasate curbele deplasărilor și derivatele acestora.

Scanned with OKEN Scanner

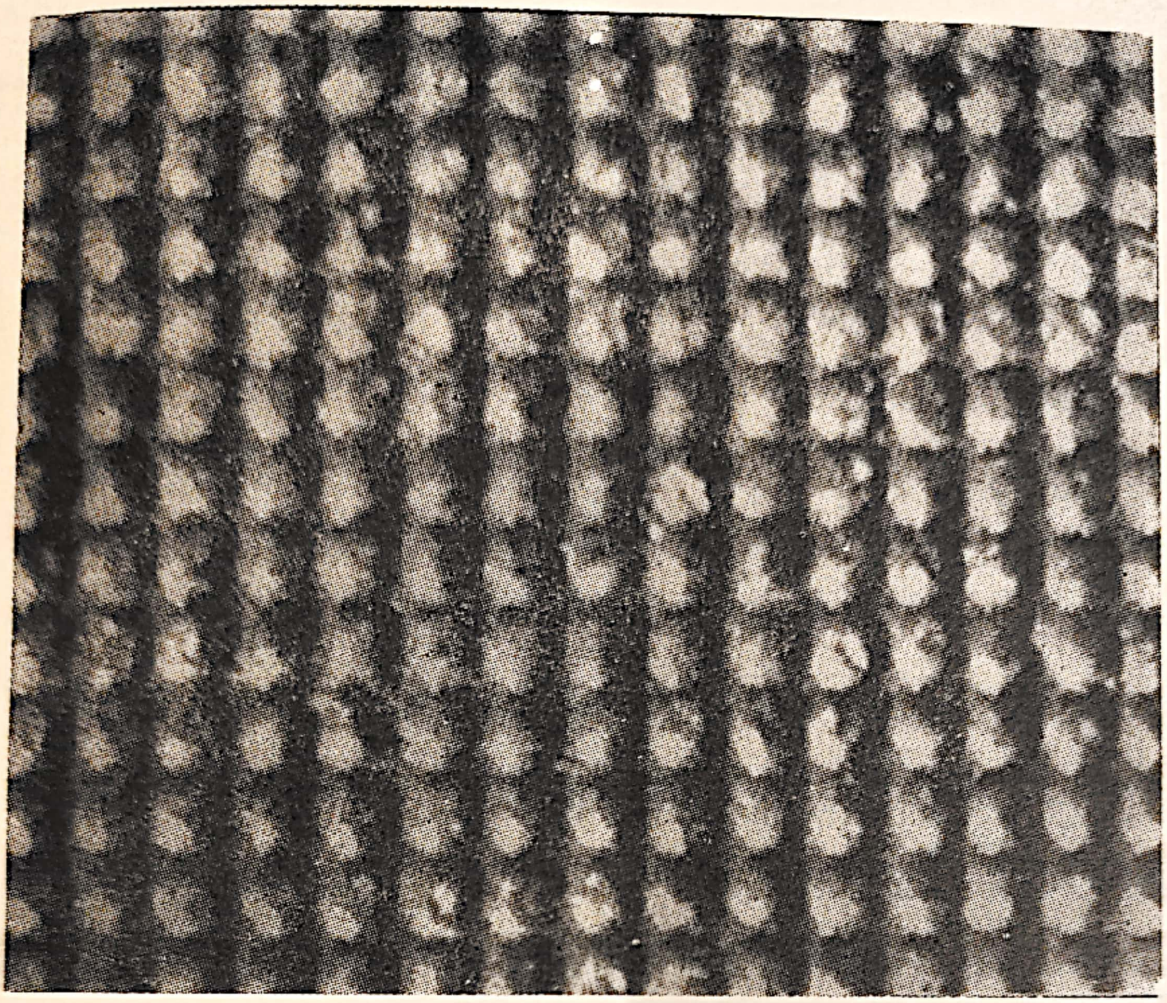


Fig. 5.31.

În fig. 5.32, b este dată variaţia lui ε_y în secţiunea AD a modelului, iar în fig. 5.32, c variaţia lui ε_y în secţiunea ox situată la marginea cusăturii de sudură.

În fig. 5.30 se observă o deviere puternică a franjelor în apropierea cusăturii de sudură, legată de împiedicarea contracţiei libere a metalului depus şi de sensul în care a fost executată sudarea. De remarcat că franjele sînt vizibile pînă la marginea cusăturii de sudură, deci reţeaua gravată s-a menţinut pînă aproape de temperatura de fuziune a metalului de bază.

5.2.11. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR ELASTICE CU AJUTORUL FRANJELOR MOIRÉ

Atît metoda reţelelor cu acelaşi pas cît şi metoda reţelelor cu pas diferenţiat sînt utilizate, la determinarea caracteristicilor mecanice ale unor materiale [14], [50], [97]. Utilizarea uneia sau alteia, dintre metodele menţionate este în funcţie, în primul rînd, de valoarea modulului de elasticitate al materialului respectiv.

Aplicaţii. 1°. Dantu [14] a utilizat franjele moiré pentru determinarea caracteristicilor elastice ale unor materiale plastice. În fig. 5.33 a se prezintă franjele obţinute, la o anumită treaptă de solicitare, a unei epruvete (fig. 5.33 b) confecţionată din plexiglas. Pe epruvetă a fost imprimată o reţea în cruce cu frecvenţa de 8 linii/mm. Aceeaşi frecvenţă a avut-o şi reţeaua martor utilizată. În fig. 5.33 c se arată evoluţia, în timpul încercării, a deformaţiilor specifice ε_x şi ε_y şi a valorii coeficientului de contracţie transversală $\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$.

Scanned with OKEN Scanner

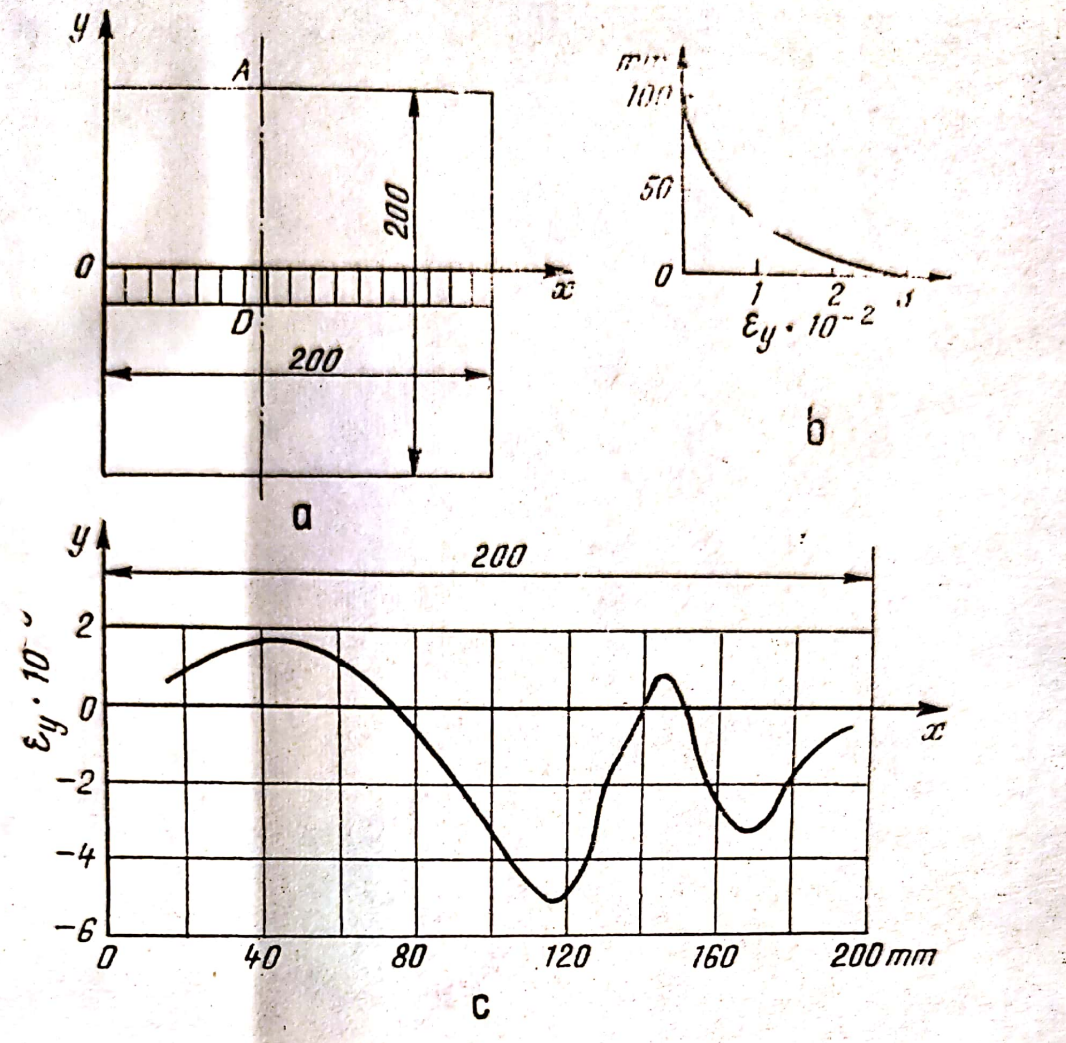


Fig. 5.32.

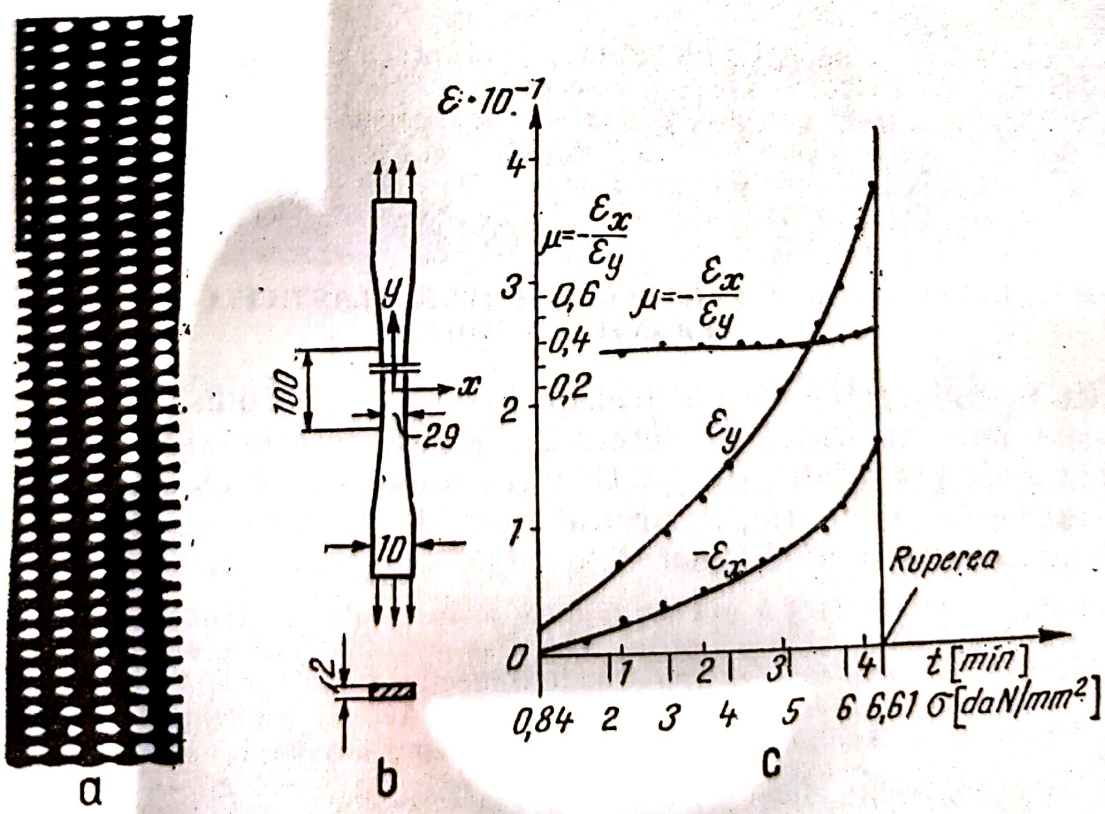


Fig. 5.33.

Scanned with OKEN Scanner

2. La catedra de rezistența materialelor de la Institutul Politehnic din Iași [50] s-au făcut cercetări, tot cu ajutorul franjelor moiré, pentru stabilirea constantelor elastice ale unor materiale plastice indigene. În fig. 5.34 sînt date valorile modulului de elasticitate și a coeficientului de contracție transversală obținute la încercarea, pînă la rupere, a unor epruvete din poliester de producție indigenă.

Pe una din fețele epruvetei (modelului) s-au imprimat, pe cale fotografică, două rețele ortogonale (rețea în cruce), cu frecvența de patru linii pe mm. Din interpretarea celor două

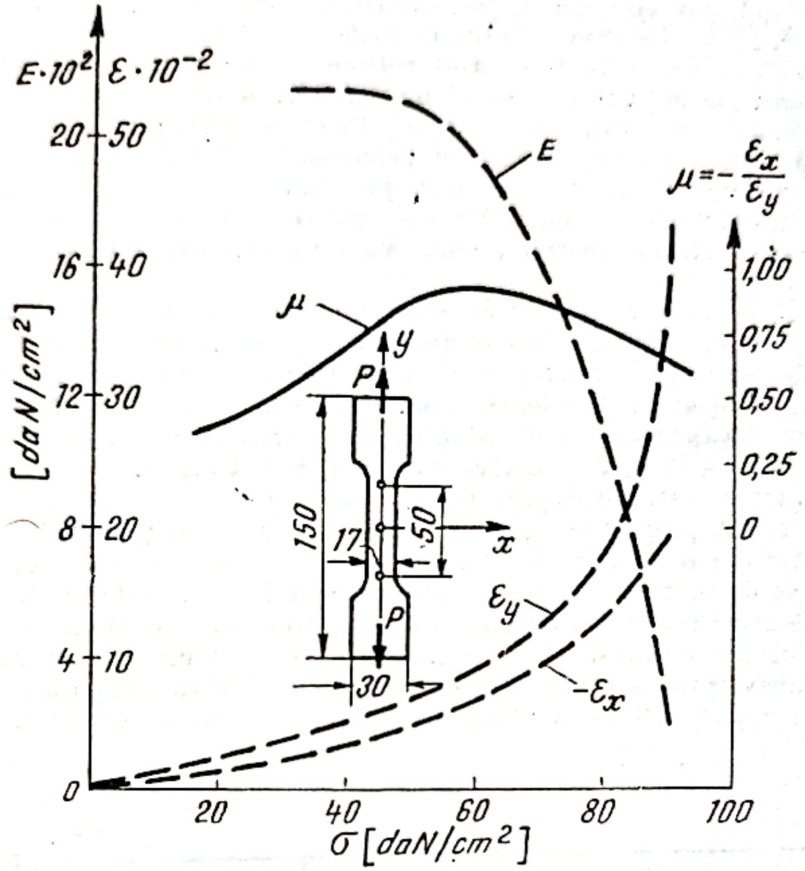


Fig. 5.34.

familii de franje, înregistrate pe cale fotografică, la diferite trepte de încărcare, au rezultat valorile deformațiilor specifice ε_y și ε_x pentru diferite valori ale tensiunii. Cu ajutorul acestora s-au calculat valorile lui μ și E date în figură.

Se observă că în domeniul deformațiilor visco-elastice coeficientul μ depășește valoarea de 0,5, adică în timpul solicitărilor de întindere, are loc, în acest domeniu, o micșorare a volumului epruvetei.

Acest fenomen a fost constatat și de Melentiev [56], care tot în cazul unor materiale plastice cu structuri locale eterogene, cum este poliesterul, a obținut, la solicitări în domeniul elasto-plastic, valori pentru coeficientul lui Poisson cuprinse între 0,6 și 0,9. De remarcat că în cazul plexiglasului (fig. 5.38) care are o structură mult mai omogenă, nu s-a constatat acest fenomen.

Pentru determinarea caracteristicilor elastice E și μ, în cazul oțelurilor sînt necesare rețele cu frecvențe mult mai mari și cu pas diferențiat pentru a se asigura o precizie corespunzătoare.

3°. *Theocaris* [97] a utilizat metoda rețelelor cu pas diferențiat la determinarea curbelor caracteristice (tensiune-deformație) ale materialelor precum și pentru studiul contracțiilor transversale. Ca exemplu se dau rezultatele cercetărilor efectuate cu epruvete plate confecționate din St42 (OL42). Cercetările au fost efectuate atît în domeniul elastic cît și în domeniul plastic, pînă la rupere. Deformațiile în domeniul plastic fiind foarte mici, măsurarea lor, cu precizie mare, s-a putut face numai utilizînd rețele cu pas diferențiat.

Scanned with OKEN Scanner

Pe o față a modelului (epruvetei) a fost imprimată, o rețea în cruce, pasul celor două rețele — orizontală și verticală — fiind $p = \frac{1}{50}$ mm. Rețeaua a fost astfel imprimată pe epruvetă încît laturile ei să fie paralele cu axele de simetrie ale modelului.

Au fost pregătite și un număr de rețele martor simple, unele cu pasul progresiv redus față de pasul p al rețelei imprimate, iar altele cu pasul progresiv sporit. Prin suprapunerea rețelelor martor peste rețeaua imprimată nedeformată, se obțin franje moiré inițiale cu valori diferite ale interfranjei. Așa cum s-a arătat, interfranja este cu atît mai mică, adică franjele sînt cu atît mai dese, cu cît diferența λ dintre pasurile celor două rețele crește (v. §. 5.2.7).

Franjele moiré inițiale, obținute cu ajutorul unei rețele cu pas redus (λ negativ), pot fi considerate ca rezultînd în urma unei alungiri fictive a rețelei imprimate, în așa măsură încît să producă deformația λ între două pasuri. În consecință, rețelele martor cu pas redus (λ negativ) sînt adecvate pentru măsurarea deformațiilor longitudinale ale epruvetei solicitată la întindere, în timp ce rețelele martor cu pas mărit (λ pozitiv) sînt adecvate la măsurarea contracțiilor transversale ale modelului. Alegerea corectă a pasului rețelei martor în cursul diferitelor faze ale încercării are mare influență asupra frecvenței franjelor moiré, deci asupra preciziei rezultatelor.

Franjele moiré formate prin suprapunerea, după ambele direcții principale, a rețelelor martor — cu pas corespunzător mărit sau micșorat — peste rețeaua imprimată, au fost fotografiate înainte de aplicarea sarcinii și după fiecare treaptă de încărcare, cu ajutorul unui film de poliester cu granulație foarte fină. Pozitivele fotografiilor franjelor s-au realizat la scară aleasă pentru exprimarea dimensiunilor epruvetei. Evaluarea valorilor componetelor deformațiilor specifice s-a făcut prin derivare grafică (vezi § 5.2.5).

Deplasările fictive, introduse prin diferențele de pas λ, dintre liniile rețelelor martor și imprimată sînt direct proporționale cu coordonatele fiecărui punct. Aceste deformații au fost scăzute algebric din deformațiile totale corespunzătoare, obținîndu-se, astfel, distribuția deformațiilor care se datoresc numai deformării epruvetei produsă de sarcina exterioară.

Cu valorile deformațiilor specifice stabilite prin interpretarea familiilor de franje determinate pentru 40 de trepte de încărcare, în fig. 5.35 s-au construit curbele caracteristice reale, longitudinală și transversală, a oțelului cercetat (OL42). Pentru comparație, în aceeași figură sînt date și curbele caracteristice convenționale stabilite, pentru același oțel, cu relațiile cunoscute.

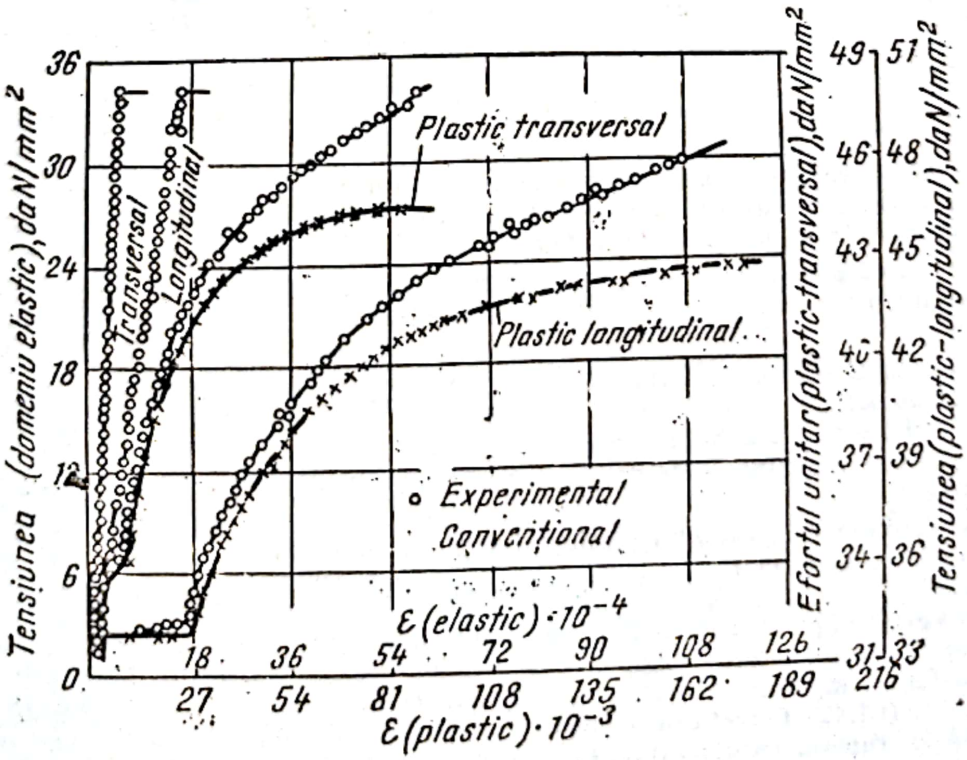


Fig. 5.35.

Scanned with OKEN Scanner

În fig. 5.35 deformațiile elastice longitudinale și transversale sînt trasate la scară mult mai mare decît cele corespunzătoare domeniului plastic [97]. Autorul a procedat astfel pentru a se putea trasa, cu mai mare precizie, porțiunea corespunzătoare domeniului elastic, a curbei caracteristice; cunoscut fiind că prin metodele tensometrice clasice construirea acestei porțiuni — din cauza deformațiilor foarte mici — se face cu mai mică precizie.

5.2.12. TENSOMETRE BAZATE PE FENOMENUL MOIRÉ

La scurt timp după ce fenomenul moiré a început să fie utilizat la măsurarea deformațiilor și a tensiunilor, s-au construit tensometre bazate pe acest fenomen, care sînt indicate, în special, pentru măsurări de lungă durată, deoarece, după cum s-a văzut, fenomenul moiré are un caracter pur geometric, neutilizînd nici un fenomen intermediar; ca urmare este scutit de schimbări în timp. Primul tensometru de acest fel a fost cel conceput de Lehman ș.a. [47], iar cel mai răspîndit este cel construit de Diruy, [23]. Acesta utilizează interferența gemetrică ce apare în cazul suprapunerii a două rețele de linii drepte, de același pas, rotite cu un unghi foarte mic (v. fig. 5.36).

S-a arătat că franjele, în acest caz, sînt perpendiculare pe bisectoarea unghiului φ iar valoarea interfranjei este dată de relația:

$$f = \frac{p}{2 \sin \frac{\varphi}{2}};$$

Unghiul φ fiind foarte mic se poate considera $\sin \frac{\varphi}{2} \approx \frac{\varphi}{2}$ deci

$$f = \frac{p}{\varphi}. \tag{5.36}$$

Dacă una din rețele primește o translație Δy, în direcția bisectoarei exterioare unghiului φ (fig. 5.36), franjele se deplasează în direcția perpendiculară pe această bisectoare. Deplasarea este egală cu f dacă

$$\Delta y = \frac{p}{\cos \varphi} \approx \mathrm{p}. \tag{5.37}$$

Ca urmare:

— măsurarea variației Δf a interfranjei permite cunoașterea variației $\Delta\varphi$ a unghiului dintre cele două rețele (relația 5.36);

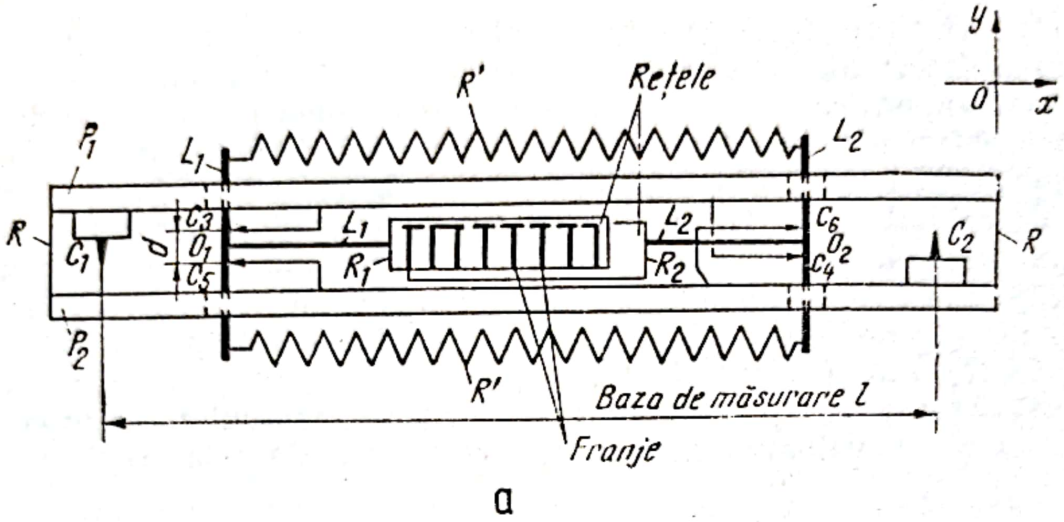
— creșterea Δf a interfranjei corespunde unei translații relative a celor două rețele după direcția perpendiculară la bisectoarea exterioară a unghiului φ.

Precizia rezultatelor depinde de valorile lui f și p precum și de finețea și contrastul franjelor moiré. Dacă se utilizează rețele cu pasul cuprins între 0,05 mm și 0,02 mm, pot fi puse în evidență variații ale unghiului φ de ordinul secundelor de arc și translații Δy de ordinul micronului.

Scanned with OKEN Scanner

Tensometrul conceput de Diruy are la bază principiile enunţate mai sus, şi este realizat în două variante.

a) *Prima variantă* face apel la măsurarea unghiului de rotaţie relativă a două reţele şi este indicată, în special, pentru măsurări de lungă durată.



a

Fig. 5.36, a

În fig. 5.36, a se prezintă schema tensometrului, care se compune din :

— două plăci prismatice paralele P_1 şi P_2 legate la capete prin lamele elastice R. O mică deplasare relativă a plăcilor P_1 şi P_2 este posibilă numai în direcţia Ox;

— două cuţite C_1 şi C_2 solidare cu plăcile P_1 şi P_2 fixate pe piesa supusă încercării. Distanţa C_1C_2 constituie baza de măsurare. Orice variaţie Δl a distanţei dintre cuţite produce o deplasare relativă a plăcilor P_1 şi P_2;

— două cuţite C_3 şi C_4, solidare cu placa P_1, şi alte două cuţite C_5 şi C_6 solidare cu placa P_2. Toate cuţitele au poziţie perpendiculară pe planul figurii şi al suprafeţei piesei supusă încercării. Distanţa dintre muchiile cuţitelor C_3 şi C_5 este aceeaşi cu distanţa dintre muchiile cuţitelor C_3 şi C_4 şi egală cu d;

— două pîrghii L_1 şi L_2 în formă de T, sprijinite pe cele două perechi de cuţite; O_1 şi O_2 reprezintă axele de rotire a celor două leviere (pîrghii);

— două resoarte R' fixate între pîrghiile L_1 şi L_2, care asigură fixarea acestora de cuţitele respective:

— la extremitatea fiecărei pîrghii este fixată cîte o reţea de linii paralele cu pasul p imprimată pe o placă metalică. Planurile celor două reţele R_1 şi R_2 sînt paralele, la o distanţă foarte mică, una de alta, şi perpendiculare pe axele de rotaţie a pîrghiilor L_1 şi L_2. Orientarea celor două reţele diferă cu unghiul φ a cărui bisectoare este paralelă cu axa Ox. Deci prin suprapunerea reţelei R_1 şi R_2 se obţin franje moiré echidistante, paralele cu axa Oy, valoarea interfranjei fiind dată de relaţia (5.36).

Scanned with OKEN Scanner

O modificare a distanței l dintre cuțitele C_1 și C_2 cu Δl antrenează o deplasare Δl a cuțitului C_3 față de cțitul C_5 și a cuțitului C_6 față de cuțitul C_4 după direcția Ox. Pîrghia L_1 se rotește cu un unghi α și pîrghia L_2 cu $-\alpha$.

Valoarea unghiului α este dată de relația:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta l}{d}. \tag{5.38}$$

Unghiul dintre cele două rețele, după deformare, va fi $\varphi + 2\alpha$, iar valoarea interfranjei

$$f' = \frac{p}{2\sin\frac{\varphi + 2\alpha}{2}},$$

Unghiurile φ și α fiind foarte mici se poate considera

$$\varphi = \frac{p}{f};\ \varphi + 2\alpha = \frac{p}{f'} \text{ și } \Delta l \approx d\alpha.$$

Deci se poate scrie

$$\Delta l = \frac{pd}{2}\left(\frac{1}{f'} - \frac{1}{f}\right). \tag{5.39}$$

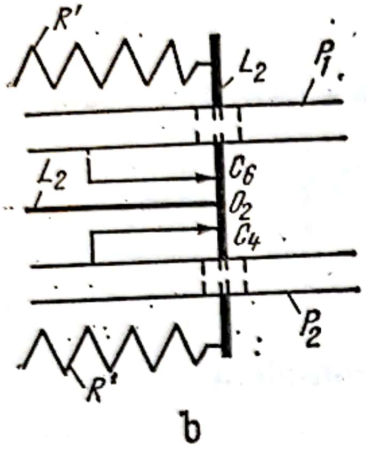
Este suficient să se măsoare interfranja inițială f și interfranja după deformare f' (valorile lui p și d fiind cunoscute) pentru a stabili valoarea deformației Δl. Valorile lui f și f' se determină cu ajutorul unei lunete cu diviziuni, montată pe un dispozitiv ce se deplasează în direcția Ox, cu ajutorul unui șurub micrometric, avînd tamburul gradat în diviziuni ce corespund la 0,01 mm.

Utilizarea acestei variante este indicată pentru măsurarea deformațiilor specifice mici, sub 10^{-3}, cu o precizie ce atinge 3.10^{-5}, produse de solicitări statice sau variabile lent, precum și la studiul fluajului unor materiale de construcții unde variația în timp a deformațiilor este foarte mică. Autorul a studiat, cu acest tensometru, fluajul unei epruvete din beton încărcată cu o sarcină constantă ($\sigma = 100$ daN/cm^2) mai multe săptămîni. Deformația specifică, după o săptămînă, a fost sub $5\cdot10^{-5}$, putîndu-se aprecia variațiuni ale tensiunii în acest material, de 1 daN/cm^2 [23].

b) În cazul celei de-a doua variante se măsoară translația relativă a două rețele, și este indicată pentru măsurarea deformațiilor în cazul solicitărilor dinamice, înregistrarea măsurărilor fiind posibilă cu ajutorul celulelor fotoelectrice asociate cu un înregistrator grafic electronic.

Scanned with OKEN Scanner

Construcţia tensometrului este aceeaşi ca şi în cazul variantei a, cu deosebirea că cuţitele C_4 şi C_6 sînt inversate ca poziţie de lucru (fig. 5.36, b). Cuţitul C_4 este fixat de placa P_2 iar cuţitul C_6 de placa P_1, deci cele două leviere se vor roti în acelaşi sens şi diferenţa iniţială de unghi dintre cele două reţele va rămîne constantă în timpul încercării. Interfranja f, de asemenea, rămîne constantă, iar franjele se mişcă în direcţia bisectoarei unghiului φ, adică după axa Ox.



b

Fig. 36,b.

Deplasarea relativă a celor două reţele, în timpul încercării, după direcţia Oy este $\Delta y = \alpha l_0$, unde $l_0 = O_1O_2$ şi α este unghiul de deviere a a celor două leviere $\left(\alpha = \frac{\Delta l}{d}\right)$ şi corespunde la trecerea a $(n + \Delta)$ franje în dreptul lunetei cu diviziuni (Δ fiind un excedent fracţionar, adică $0 \leqslant \Delta \leqslant 1$).

Rezultă, deci

$$\Delta y = (n + \Delta)\, p \text{ şi } \Delta l = d\,\frac{\Delta y}{l_1}\cdot$$

sau

$$\Delta l = \frac{(n + \Delta)\, p \cdot d}{l_1} \tag{5.40}$$

unde, $p = \frac{1}{20}$ mm, $d = 3$ mm şi $l_1 = 90$ mm.

Deoarece *baza de măsurare* a tensometrului este relativ mare ($l = 150$ mm) utilizarea lui este indicată numai dacă cîmpul deformaţiilor este uniform sau uşor variabil.

Pentru ca eventualele variaţii de temperatură să nu influenţeze rezultatele, tensometrul, în ambele variante, este prevăzut cu compensator termic.

Detalii în legătură cu construcţia şi reglajul celor două variante ale tensometrului sînt date în lucrarea [23].

Tensometrul conceput de Vafiadakis [103] se bazează pe principiul deplasării unghiulare relative a două reţele identice. Una dintre reţele este fixată pe corpul aparatului şi a doua pe un braţ ce pivotează în jurul unui punct. Deplasarea liniară v corespunzătoare unui punct al modelului ce urmează să fie măsurată, este transmisă braţului la distanţa d de punctul de pivotare.

Raportul dintre frecvenţa franjelor N_x şi deplasarea v este dat de relaţia

$$\frac{N_x}{v} = \frac{f}{d} \tag{5.41}$$

unde f este frecvenţa liniilor celor două reţele [97]. În cazul tensometrului menţionat $f = 20$ linii/mm; $d = 12{,}7$ mm şi $\frac{N_x}{v} = 1{,}5$ franje pe mm, pentru $v = 1$ mm.

Scanned with OKEN Scanner

Holister și Luxmoore [45], au construit, de asemenea, un tensometru, (fig. 5.37) de mare sensibilitate, bazat pe fenomenul moiré, cu rețele avînd pas diferențiat (v. §. 5.2.7).

Acest tensometru — prezentat schematic în fig. 5.37, utilizează o rețea fixă, montată pe rama aparatului R și o rețea similară glisantă ce pivotează pe două pîrghii, dintre care una formează brațul de acționare (A) cu un raport de multiplicare de 10, iar cealaltă pîrghie (B) este liberă. Mărirea optică produsă cu ajutorul franjelor moiré rezultate din suprapunerea celor două rețele este de 100. Deci raportul total de multiplicare este de $10 \times 100 = 1000$. Rețelele utilizate au coeficientul de transmitanță mai mic de 50% obținîndu-se astfel franje mai ascuțite, din care cauză, se poate detecta o franjă cu grosimea de $\frac{f}{100}$, ceea ce contribuie la mărirea preciziei.

Frecvența rețelei fixe este de 40 linii/cm, iar a rețelei glisante de 39,5 linii/cm, rezultînd o interfranjă inițială cu $f' = 25$ mm. Se poate detecta o franjă cu o toleranță de $\pm$ 0,25 %. Deci sensibilitatea teoretică a aparatului este de 10^{-5}.

În fig. 5.38 se prezintă o secțiune prin tensometrul construit de Wiemer și colaboratorii săi [105] care utilizează rețele cu pas diferențiat de 0,2 mm

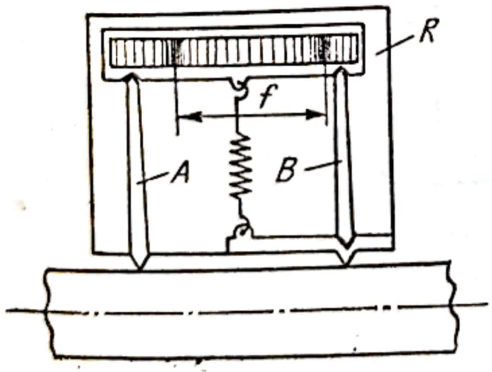


Fig. 5.37.

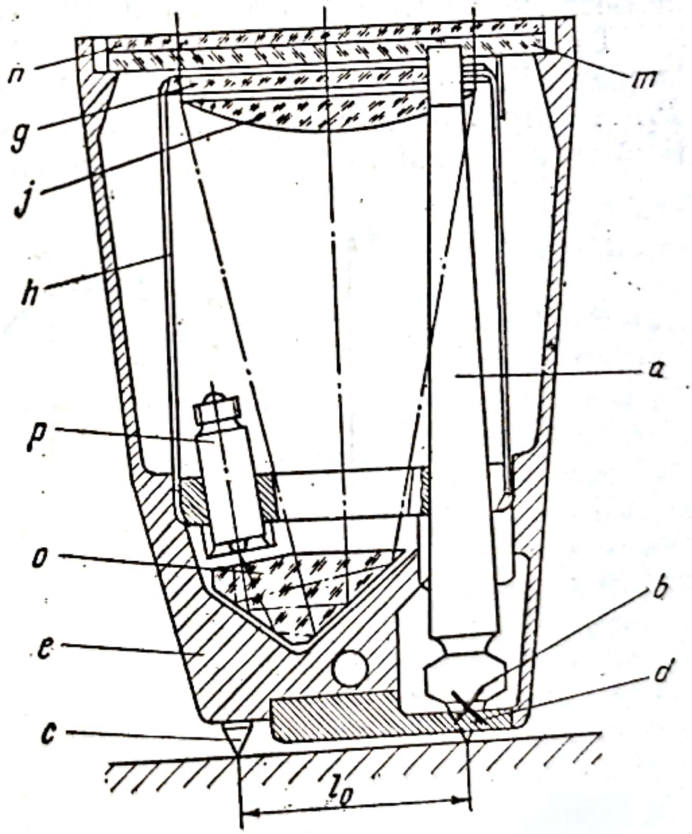


Fig. 5.38.

și 0,202 mm, realizîndu-se un raport de transformare optic de 100. Pe cale mecanică — cu ajutorul pîrghiei a ce oscilează în jurul articulației

b se mai obţine un raport de amplificare a deformaţiei de 20. Distanţa dintre cuţitul fix c şi cuţitul mobil d (baza de măsurare) este de 20 mm. În corpul e al tensometrului se mai găsesc : o lentilă concavă j, reţeaua mobilă g montată în suportul h, reţeaua fixă m, şaiba de sticlă mată cu scală n, prisma pentru reflexia totală o şi lampa pentru lumină difuză p. La acest tensometru se pot măsura deformaţii minime de $0{,}5.10^{-4}$.

O prezentare detailată a tensometrelor bazate pe fenomenul moiré este cuprinsă în lucrarea elaborată de L.N. Presnuchin ş.a. [72].

5.2.13. STUDIUL STĂRII DE DEFORMAŢIE ÎN CAZUL MODELELOR TRIDIMENSIONALE

Pentru studiul stării de deformaţie cu ajutorul franjelor moiré în cazul modelelor tridimensionale se utilizează modele transparente din material plastic sau sticlă.

Materialul din care se realizează modelul trebuie să aibă următoarele proprietăţi :

— să fie omogen şi perfect transparent;

— să nu aibă un coeficient fotoelastic prea ridicat pentru a nu dubla imaginea reţelei deformate. În cazul cînd totuşi se utilizează un material fotoelastic se va plasa un polariscop în faţa aparatului de fotografiat pentru eliminarea imaginii produsă de razele secundare. Plexiglasul este unul dintre materialele ce îndeplineşte condiţiile de mai sus.

În model se includ mai multe reţele orientate după planuri paralele la planurile de referinţă xOz (reţelele P_1', P_2', ...) şi yOz (reţelele P_1, P_2, ..., fig. 5.39). În acest scop se secţionează modelul, cu ajutorul unui fierăstrău mecanic, după planurile în care urmează să se plaseze reţelele.

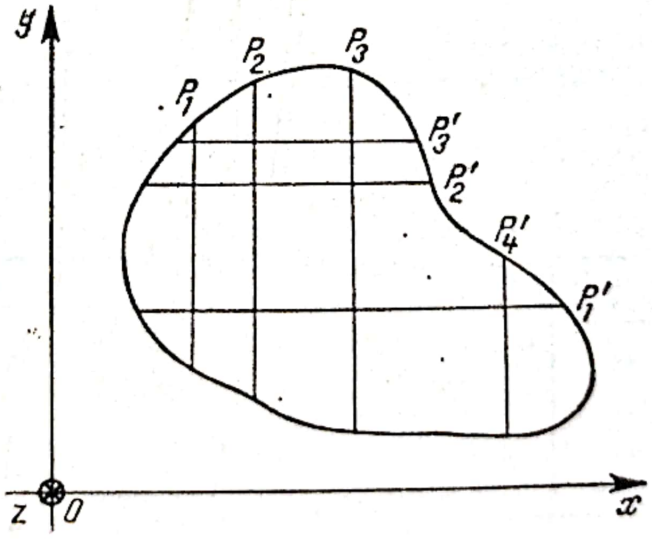


Fig. 5.39.

După ce suprafeţele au fost curăţite cu acetonă, se lipesc reţelele pe cîte una din feţele tăiate. Reţeaua, formată din suprapunerea, la 90°, a două serii de linii paralele cu pas egal, imprimată pe un film, se presează puternic pe material pentru ca stratul de adeziv să rămînă cît mai subţire.

Scanned with OKEN Scanner

După ce rețelele au fost imprimate, în diferite seţiuni ale modelului, părţile componente ale modelului se lipesc, realizînd modelul inițial, din care, prin polizare, se obţine forma dorită pentru modelul ce face obiectul cercetării.

Modelul este scufundat într-un lichid, cu același indice de refracție și, după ce i se imprimă deformația dorită, prin puneri la punct succesive ale aparatului fotografic se obțin imaginile rețelei deformate incluse în diferitele secțiuni ale modelului.

Instalația utilizată este prezentată în fig. 5.40 și se compune dintr-o cuvă de sticlă C care conține, în cazul modelelor de plexiglas, lichid de siliciu, care are același indice de refracție ca modelul; o sursă de lumină

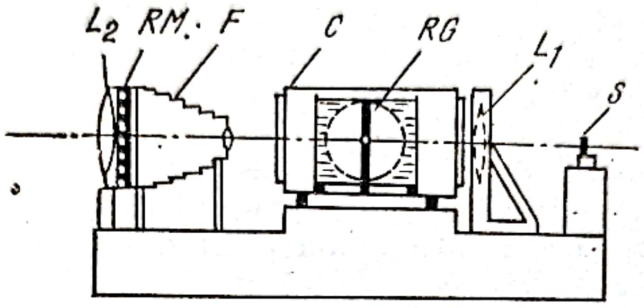


Fig. 5.40.

S, colimată de o lentilă L_1, care luminează modelul. Un aparat fotografic stabil F, cu rețeaua martor (RM) juxtapusă pe ecranul de geam mat, fotografiază franjele moiré ce se formează pe acest ecran, focalizînd corespunzător aparatul pentru fiecare rețea.

Imaginea rețelei deformate, în mărime naturală, este prinsă pe geamul mat al aparatului fotografic interferînd cu o rețea martor, cu același pas ca rețeaua imprimată.

Printr-o mică modificare a distanței dintre lentila aparatului fotografic L_2 și rețeaua RM rezultă franjele moiré inițiale, ca în cazul rețelelor cu pas diferențiat. Interpretarea franjelor moiré se face așa cum s-a arătat la § 5.2.5.

Eliminarea completă a influenței, asupra franjelor moiré, a celorlalte rețele paralele cu rețeaua fotografică se poate realiza dacă se folosește, pentru fiecare rețea, un model separat. Bineînțeles că în acest caz trebuie asigurată reproductibilitatea, atît a deformației modelelor cît și a dimensiunilor acestora, practic, greu de realizat. În cazul pieselor cu planuri de simetrie (sferă, cilindru), dacă forțele exterioare lucrează în aceste planuri, pentru studierea stării de deformație este suficientă o singură rețea, sau două rețele în cruce, introduse în secțiunile de simetrie cuprinse în planul forțelor.

Theocaris [97] a utilizat, cu succes, franjele moiré la cercetarea distribuției deformațiilor plastice din secțiunile interioare ale corpurilor opace și anume a studiat distribuția deformațiilor interioare din cuburi de cupru supuse la compresiune. După ce cuburile au fost tăiate în felii, pe suprafețele interioare ale feliilor tăiate s-au reprodus, prin gravare, rețele în cruce (vezi § 5.3.1). Apoi feliile au fost lipite împreună cu argint.

Scanned with OKEN Scanner

Cuburile reconstituite au fost supuse la compresiune, şi, după separarea ulterioară a feliilor, cu ajutorul reţelelor martor, s-au obţinut franjele a căror interpretare a arătat distribuţia deformaţiilor plastice din interiorul cubului.

Studiul stării spaţiale de deformaţie într-un model transparent tridimensional cu ajutorul franjelor moiré se realizează cu mai puţin dificultăţi decît prin fotoelasticitate, deoarece :

— nu este limitat numai la utilizarea materialelor plastice înzestrate cu proprietăţi optice de birefrigerentă;

— la metoda tensiunilor îngheţate, utilizată în fotoelasticitatea tridimensională, modelul se taie în felii — după diferite direcţii — care se analizează individual, în timp ce la metoda moiré este suficient ca pentru fiecare reţea să se facă trei înregistrări fotografice ale franjelor obţinute cu trei poziţii ale reţelei martor, orientate la cîte 45°, pentru analiza cîmpului deformaţiilor, indiferent de natura deformaţiilor (elastice, plastice sau vîscoelastice);

— poate fi studiată şi plasticitatea tridimensională.

Sciammarella şi Fu Pen Chiang [81], plecînd de la faptul că reţeaua, iniţial plană, după deformarea modelului devine o suprafaţă curbă în spaţiu, au stabilit relaţii, care leagă deformaţiile specifice din planul reţelei de deplasările după direcţia perpendiculară la acest plan.

În lucrarea [81] autorii utilizează aceste rezultate la studierea contactului unei sfere cu un spaţiu semiinfinit.

Aplicaţii. 1°. Cu metoda prezentată mai sus, Dantu a studiat deformaţia unei sfere din plexiglas cu diametrul de 45 mm, comprimată între două plane paralele considerate nedeformabile. În planul vertical mediu al sferei este inclusă o reţea în cruce cu liniile verticale şi orizontale. În fig. 5.41 se prezintă franjele obţinute cu o reţea martor orizontală, avînd ace-

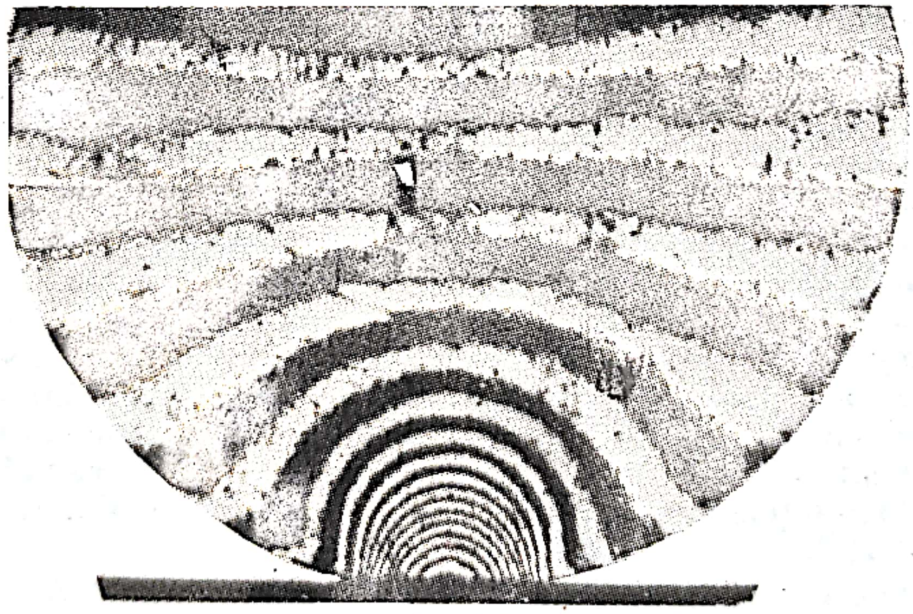


Fig. 5.41.

laşi pas cu reţeaua imprimată $\left(p = \frac{1}{20}\ \text{mm}\right)$. Se observă că, în apropierea punctului de contact cu sarcina, franjele sînt foarte dese, deformaţiile în această zonă au intrat în domeniul plastic.

Scanned with OKEN Scanner

Durelli și Daniel [19] au studiat aceeași problemă în domeniul plastic, pentru o sferă cu diametrul de 174 mm, confecționată dintr-un material transparent, cu limita elastică ridicată (hysol 8530 C.H.).

2°. Diruy [20] a studiat starea spațială de deformație în cazul a doi cilindri de araldit, unul solicitat în domeniul elastic, altul în domeniul plastic. Pentru fiecare cilindru, în planul mediu al cilindrului, a fost introdusă o rețea în cruce, ortogonală, cu pasul $p = \frac{1}{20}$ mm.

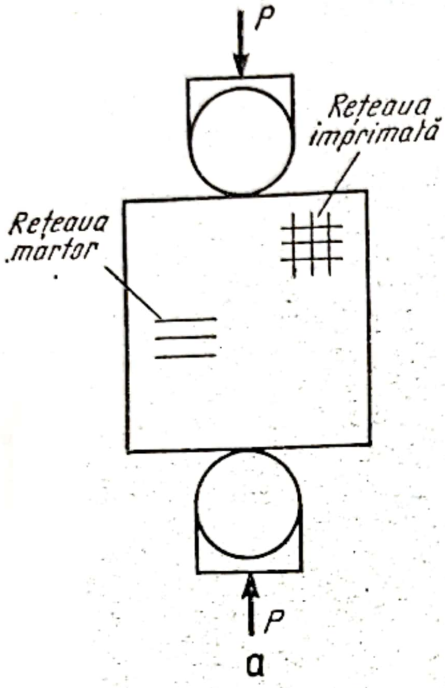


Fig. 5.42.

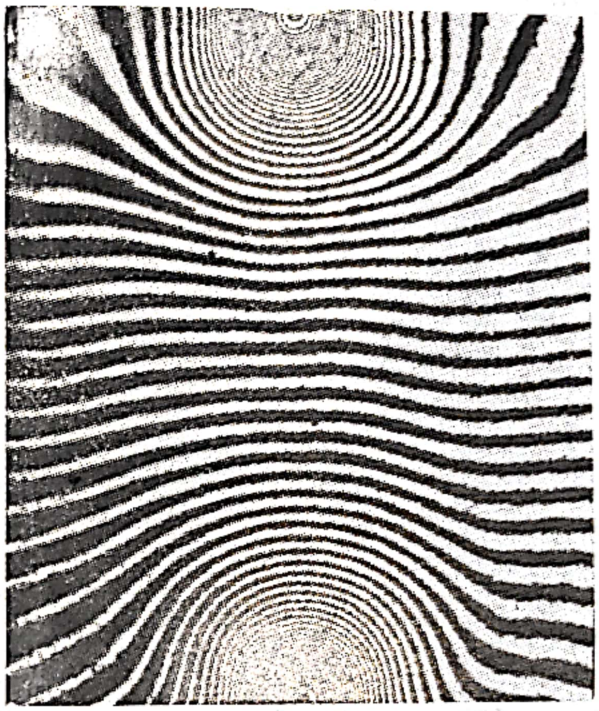


Fig. 5.43.

În fig. 5.42 se arată schema de încărcare, iar în fig. 5.43 se prezintă franjele moiré obținute cu o rețea martor orizontală, de același pas cu rețeaua imprimată.

Deformațiile sînt elastice, în afară celor din regiunea situată în apropierea punctelor de contact cu bilele prin intermediul cărora s-a aplicat sarcina.

5.3. REALIZAREA REȚELELOR ȘI EFECTUAREA ÎNCERCĂRILOR

5.3.1. REALIZAREA REȚELELOR

Din cele expuse în capitolul precedent a rezultat că pentru utilizarea, cu bune rezultate, a franjelor moiré, în tensometrie, este necesar să se dispună de o rețea principală de bună calitate cu o frecvență corespunzătoare a liniilor.

Realizarea rețelelor pe cale mecanică a) *Rețele simple cu același pas.* La început au fost utilizate rețele litografice cu o frecvență de 4 — 6

linii/mm*). Aceste rețele, avînd frecvență redusă, pot fi utilizate numai la măsurarea deformațiilor plastice mari.

Prin fotografierea la o scară mai mică se poate obține o rețea, de bună calitate, cu frecvența liniilor mai mare, dacă se utilizează un aparat fotografic special de fotogravură. În fig. 5.44 se prezintă fotografia unui astfel de aparat utilizat la Laboratorul Central de Poduri și Șosele din Paris. Aparatul este montat pe un pat metalic lung de 3 m, susținut de patru picioare cu amortizoare din cauciuc, pentru a izola aparatul de eventualele vibrații ale pardoselii. Montarea aparatului foto-

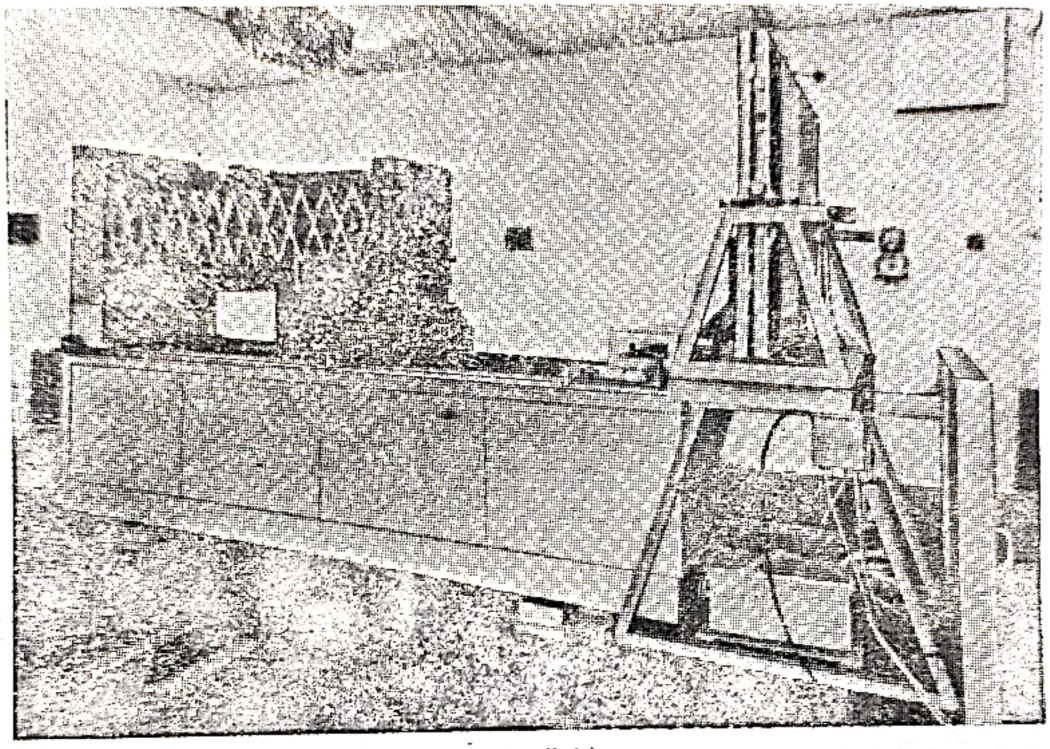


Fig. 5.44.

grafic pe patul metalic este realizată prin intermediul unui mecanism ce servește la translația lui. Această translație se face, cu precizia necesară, printr-un angrenaj de dublă cremalieră și pinion. Carcasa lentilei aparatului este echipată cu dispozitive pentru asigurarea mișcării verticale și orizontale în vederea punerii la punct a imaginii foto. La celălalt capăt al aparatului este așezată rama suportului rețelei. Aceasta posedă un mecanism pentru mișcarea de translație și reglajele unghiulare necesare în vederea asigurării paralelismului cu lentila.

Lentilele utilizate, tratate apocromatic, acoperă o gamă relativ largă de distanțe focale și sînt corectate în limita unor toleranțe de ordinul a $\pm$ 0,01 %. Aparatul fotografic prezentat în fig. 5.44 are posibilitatea de reducere a imaginii de la 5 la 1 și de mărire de la 1 la 2,5.

---

*) Asemenea rețele s-au utilizat la primele lucrări, realizate în acest domeniu, la Catedra de rezistența materialelor de la Institutul Politehnic din Iași. Tot aici s-au utilizat rețele cu frecvența de 6 linii/mm, gravate mecanic, direct pe model, cu ajutorul instalației de la Combinatul Poligrafic „Casa Scînteii", București.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru reproducerea fidelă a reţelei principale, la scara aleasă, este necesară asigurarea unui paralelism exact între planul reţelei principale, planul lentilei şi planul imaginii, care poate fi obţinut prin cunoscuta metodă a reflecţiilor multiple, realizată cu ajutorul unor oglinzi. Reţelele realizate cu acest procedeu sînt de bună calitate.

Recent au fost realizate maşini speciale de liniat reţele care pot trasa 150 — 300 linii/mm, cu o uniformitate aproape absolută a distanţelor dintre linii (erori sub 0,1 μ). Maşina de liniat, în principiu, este formată dintr-un corp de trasat, care susţine o sculă cu diamant ce se mişcă deasupra unui car, pe care se sprijină reţeaua. Un şurub, de mare precizie dirijează carul faţă de scula cu diamant. Maşina este înzestrată cu un sistem barometric de compensare a presiunii pentru a se menţine o ambianţă stabilă în timpul lucrului şi pentru compensarea erorilor — datorită pasului şurubului, — ce depăşesc erorile admise la reţea. Cu această maşină se realizează reţele principale cu laturi de 300 — 500 mm [97].

O altă metodă — tot mecanică — utilizată pentru obţinerea reţelelor principale este cea propusă de Fildler şi Nurse [38] şi realizată în Laboratorul Tehnic Naţional din Glasgow, iniţial pentru reţelele utilizate la comanda maşinilor unelte. Reţelele realizate sînt în formă de benzi cu lungimea de 600 mm şi lăţimea de 25,4 mm, cu următoarele frecvenţe: 40, 80 şi 160 linii/mm, înregistrate pe plăci fotografice de sticlă avînd liniile paralele cu latura mică a plăcilor.

Schema de funcţionare a maşinii, construită în acest scop, este arătată în fig. 5.45. Partea esenţială a maşinii o constituie un car susţinut de două lagăre cu aer; unul dintre lagăre asigură şi ghidarea carului pentru

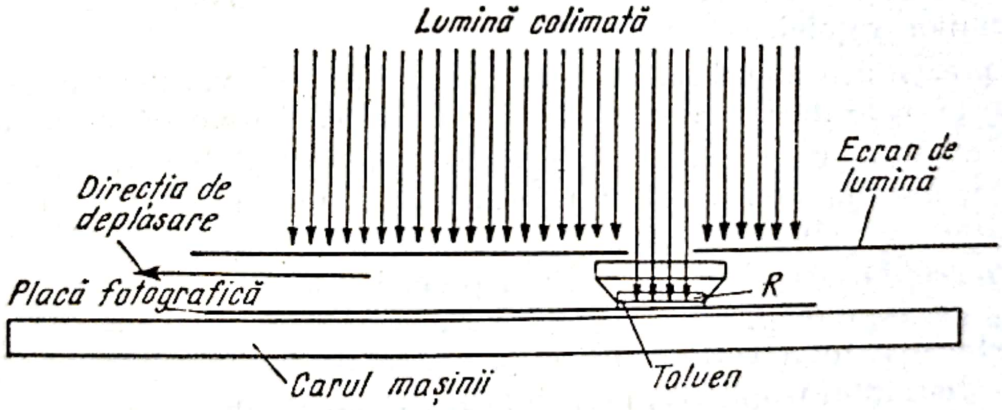


Fig. 5.45.

deplasarea lui în linie dreaptă. Un ecran de lumină permite luminii colimate să cadă numai pe acea parte a plăcii fotografice care se află imediat sub reţeaua R de control a maşinii. Un mecanism electric de remorcare deplasează carul cu o viteză uniformă de circa 0,9 m/oră. Procedeul de liniere a unei reţele este următorul:

Se aşază reţeaua de control pe carul maşinii şi se reglează cu ajutorul unui microscop, în aşa fel încît liniile reţelei să coincidă cu direcţia de deplasare. Apoi se aşează pe carul maşinii o placă fotografică — cu stratul

Scanned with OKEN Scanner

fotosensibil în sus — și se reglează înălțimea carului, în așa fel încît rețeaua de control R să se miște în lungul și deasupra plăcii fotografice la o înălțime, față de placă, cuprinsă între 0,05 — 0,15 mm.

Printr-o singură deplasare a carului mobil, în timp ce placa fotografică este expusă unei lumini colimate, se produce o rețea mare cu linii avînd același pas cu rețeaua principală (rețeaua de control). În timpul expunerii spațiul dintre cele două plăci se menține umplut cu toluen, fără conținut de sulf, pentru împiedicarea reflectării luminii pe fețele de sticlă interioare. Instalația, în timpul expunerii, este ecranată contra oricărei lumini străine și permite luminii colimate să cadă — așa cum s-a arătat mai sus — numai pe acea parte a plăcii fotografice care se află sub rețeaua de control. Calitatea rețelelor realizate se verifică prin suprapunerea rețelei de control peste rețeaua liniată. Absența franjelor indică inexistența erorilor de pas sau de deviații de la linia dreaptă.

Diruy [20] a introdus o nouă metodă pentru sporirea frecvenței rețelei față de frecvența rețelei principale. În acest scop el a folosit rețele principale cu o transmitanță de 0,25. Printr-o primă expunere la lumină a unei plăci fotografice, peste care s-a așezat rețeaua principală, s-a folosit o parte a rețelei. Apoi s-a utilizat un dispozitiv adecvat pentru translatarea rețelei principale față de placa fotografică, într-o direcție perpendiculară pe direcția liniilor rețelei principale, cursa de translație fiind egală cu jumătatea pasului rețelei principale. Printr-o nouă expunere, executată în condiții identice cu prima, s-a produs o a doua familie de linii, realizîndu-se astfel o rețea cu frecvență dublă față de frecvența rețelei principale. Aceeași metodă poate fi utilizată pentru triplarea sau cuadruplarea frecvenței unei rețele față de frecvența rețelei principale, fără reducerea dimensiunilor rețelei.

O prezentare detaliată privind realizarea și verificarea rețelelor obținute pe cale mecanică este făcută de G.W. Stroke în lucrarea [89].

De menționat că cea mai mare frecvență de linii realizate pe cale mecanică, pînă în prezent, la un format al rețelei de 50 × 50 mm, este de 250 linii/mm [104]

b) *Rețele în cruce, ortogonale.* Un procedeu adecvat pentru obținerea rețelelor în cruce ortogonale este cel al electroformării. Procedeul constă din producerea unor ecrane din cupru, argint sau aur prin evaporarea în vid a metalului respectiv, pe plăci din sticlă. Pe placa de sticlă se gravează linii, după direcții ortogonale, cu ajutorul unei mașini de trasat, înlăturîndu-se metalul din aceste două zone. Apoi placa de sticlă se atacă cu acid fluorhidric, adîncindu-se liniile trasate.

Rețelele obținute sînt de bună calitate, avînd o transmitanță predeterminată ce poate ajunge ușor la 50%. Ele sînt utilizate curent în laboratoarele de încercarea materialelor de la Universitatea Tehnică din Atena, conduse de P. Theocaris. La aceste laboratoare se utilizează și rețele în cruce realizate printr-un procedeu fotochimic prezentat în lucrarea [97].

Fidler și Nurse — prin procedeul prezentat anterior — au realizat și rețele în cruce ortogonale, prin suprapunerea a două rețele cu linii, una

Scanned with OKEN Scanner

peste alta, cu axele lor orientate reciproc la 90°. Succesul acestei tehnici depinde, în mare măsură, de precizia cu care se poate face această suprapunere. Pentru obținerea unui grad mare de precizie, la suprapunerea celor două rețele, autorii au construit un dispozitiv simplu care este prezentat în lucrarea [38]. Cu ajutorul instalației prezentate schematic în fig. 5.45 se expune ansamblul unei lumini colimate, și după trecerea timpului normal de expunere, rețeaua principală se rotește, cu ajutorul dispozitivului menționat, cu un unghi de 90° și apoi se face o a doua expunere. Placa fotografică după developare reprezintă negativul rețelei în cruce.

c) *Rețelele circulare.* Pentru realizarea unor rețele circulare echidistante, Diruy [21] a utilizat următoarea metodă : Un cilindru gol, cu peretele subțire, este rotit în jurul axului său cu ajutorul unui electromotor sincron, prevăzut cu o cutie de viteze pentru a se putea realiza o viteză mică și reglabilă. Cilindrul aduce o fantă în dreptul unei raze geometrice a bazei lui, din fața unui aparat fotografic stabil. Fanta este acoperită de un sector al unei rețele cu linii avînd direcția principală a liniilor după linia centrală a fantei. Iluminarea rețelei se face cu ajutorul unui difuzor format dintr-un tub fluorescent și un geam mat așezat între sursa de lumină, situată în interiorul cilindrului, și rețea. Rotind, cu viteză redusă, cilindrul, în camera obscură se formează, pe placa fotografică din aparatul foto, o rețea circulară cu frecvența cercurilor egală cu frecvența liniilor rețelei principale liniare.

Fidler și Nurse [38], pentru realizarea rețelelor circulare, au utilizat un procedeu similar care constă, în esență, din rotirea unei plăci fotografice sub o fantă, în formă de sector curbiliniu, îngustă, a unei rețele cu linii supuse unei lumini monocromatice colimate. Dispozitivul utilizat este format dintr-un rotor greu, pe care se fixează placa fotografică, un suport pentru placa rețelei și un microscop.

Deoarece timpii de expunere sînt relativ lungi, este foarte importantă realizarea unei mari stabilități a mecanismului de rotire. În acest scop au fost utilizate, ca și la dispozitivul din fig. 5.45, lagăre cu aer, deoarece ele asigură menținerea unui centru de rotire constant. Forma de sector curbiliniu a fantei este astfel stabilită încît să se realizeze o rețea cu o transmitanță de aproape 50%, luîndu-se în considerare și efectul alunecării. În lucrările [56], [97] se dau detalii în legătură cu realizarea rețelelor circulare și radiale.

d) *Rețelele cu pas diferențiat.* S-a încercat, fără succes, ca rețelele cu pas diferențiat să fie obținute prin fotografierea la o scară foarte puțin mărită sau redusă a rețelei principale, realizată prin una din metodele prezentate mai sus. O metodă care a dat rezultate bune este bazată pe caracteristicile de înghețare a deformațiilor ale unui material fotoelastic și anume Araldit CT 200.

Pe o bară cu secțiunea dreptunghiulară, confecționată din acest material, s-a imprimat o rețea principală, aplicîndu-se procedeul K.P.R., după care bara a fost solicitată la întindere, în timp ce a suportat un ciclu tipic de înghețare a eforturilor fotoelastice. Cu alte cuvinte, s-au fixat, la temperatura camerii, deformațiile produse la temperatură mai ridicată,

Scanned with OKEN Scanner

cînd materialul se găsea în stare plastică, astfel că rețeaua, care inițial avea frecvența de 20 linii/mm, a rămas întinsă cu numai 19,98 linii/mm, apoi s-a făcut o copie a acestei rețele. Metoda s-a repetat în sens invers pentru producerea unei rețele cu frecvență de 20,02 linii/mm [38].

La ora actuală, procedeul cel mai utilizat pentru realizarea practică a rețelelor cu pas diferențiat este cel aplicat de Theocaris [97]. După acest procedeu imaginea rețelei imprimate pe model este formată, cu un ordin de mărire, pe geamul mat al unui aparat fotografic staționar. Franjele moiré formate din suprapunerea rețelei martor peste imaginea rețelei imprimate sînt fotografiate cu un al doilea aparat fotografic staționar. Printr-o foarte ușoară sporire sau micșorare a ordinului de mărire a imaginii rețelei imprimate — realizată prin reglări corespunzătoare ale șasiului aparatului fotografic — se pot realiza, cu o singură rețea, diferite valori pentru λ (diferența dintre pasul rețelei martor și pasul rețelei imprimate pe model).

Realizarea rețelelor pe cale holografică. Datorită inconvenientelor esențiale ale rețelelor divizate pe cale mecanică (precizie limitată, format redus, preț de cost ridicat), în ultimii ani s-au făcut cercetări pentru găsirea unor procedee noi de execuție, mai perfecționate. Printre acestea un loc de frunte ocupă realizarea rețelelor pe cale holografică (v. §. 5.7). În legătură cu acest procedeu a făcut cercetări S. M. Burch (7), Rudolf și Schmahl [79].

Procedeul se bazează pe interferența dublului fascicul utilizat în holografie.

Interferența celor două fascicule se poate realiza prin diferite aranjamente optice. În fig. 5.46, a este prezentată schema optică propusă în lucrarea [79], unde : O este un dispozitiv optic de divergență pentru razele laser, care trec prin fanta F ; E reprezintă o oglindă parabolică care reflectă razele paralel pe cele două oglinzi plane Pl ; H reprezintă placa fotografică, α unghiul de penetrație. O rețea cu linii paralele corespunde hologramei unui punct situat la o distanță infinită.

Precizia realizată în cazul rețelelor obținute pe cale holografică este mult superioară celei realizate în cazul rețelelor divizate pe cale mecanică [87]. Lățimea minimă a liniilor rețelei este limitată prin jumătatea lungimii de undă a luminii utilizate iar numărul total de linii de lungimea de coerență a fasciculului. În fig. 5.46, b se prezintă o porțiune dintr-o rețea obținută pe cale holografică, cu pasul 2 μm (500 linii/mm).

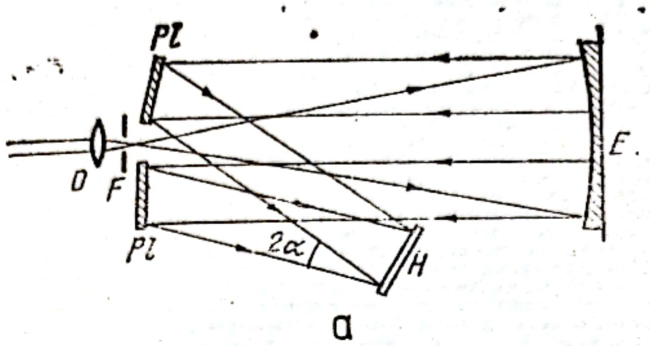
În lucrarea [104] se prezintă o sinteză privind utilizarea rețelelor holografice în tensometria bazată pe fenomenul moiré, iar la paragraful 5.5, din prezenta lucrare, se arată aplicațiile holografiei și în cazul altor metode tensometrice.

Copierea fotochimică a rețelelor. În lucrarea [14]—pornind de la proprietățile ce trebuie să le aibă rețeaua imprimată — se prezintă tehnologiile utilizate pentru realizarea unei rețele de calitate.

Cele mai recomandate tehnologii conțin operații de copiere fotochimică. Față de straturile clasice argint — gelatină, lacurile fotochimice, așa cum s-a arătat mai sus, sînt mai avantajoase.

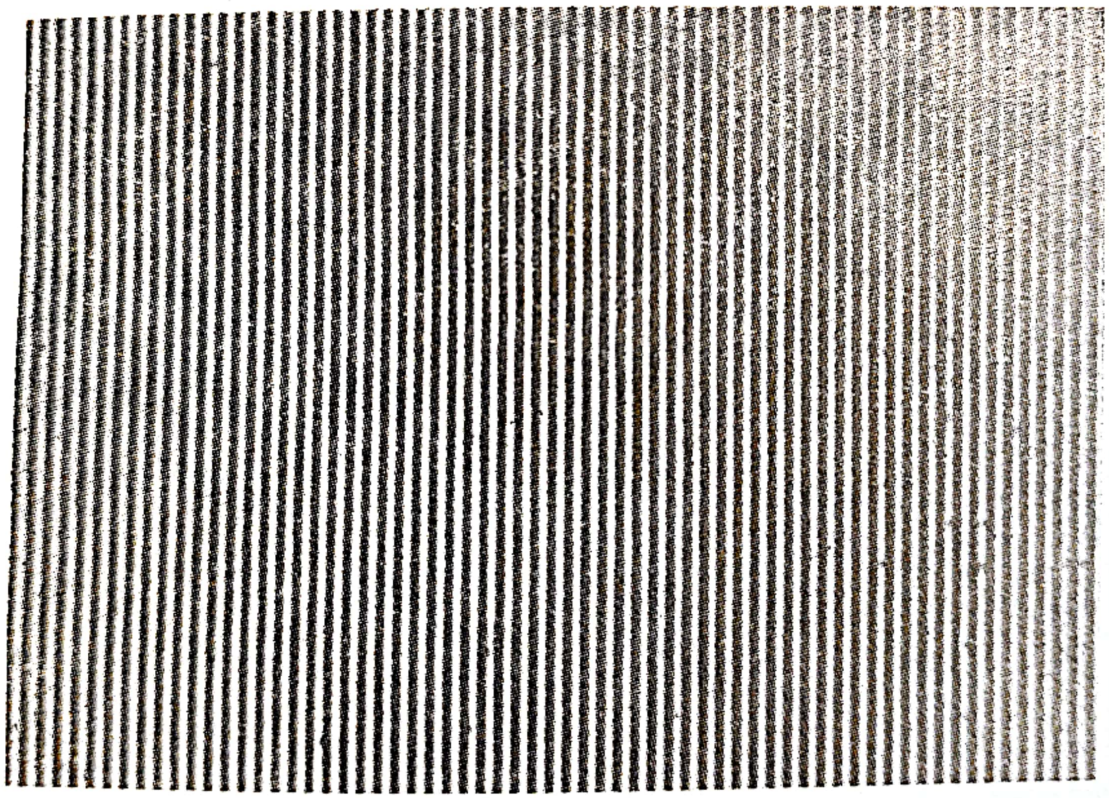
Scanned with OKEN Scanner

Firma Wolfen din R.D.G. produce un sortiment de lacuri foto foarte valoros. Dintre lacurile negative (care sub influenţa razelor ultraviolete se întăresc) se menţionează lacurile FK_1 şi FK_{11}, iar dintre lacurile pozitive (sub influenţa razelor ultraviolete se descompun) se menţionează lacurile



a

a)



b)

Fig. 5.46.

PKL_{22} şi PKL_{43}. În fig. 5.47 se prezintă microfotografia unei reţele cu o frecvenţă de 250 linii/mm realizată cu lacul FK_1 [104].

În fig. 5.48 este arătată tehnologia realizării reţelelor imprimate pe model — grosimea stratului de lac foto este de 0,2 — 0,4 mm depus prin centrifugare pe suprafaţa modelului.

Scanned with OKEN Scanner

Fig. 5.47.

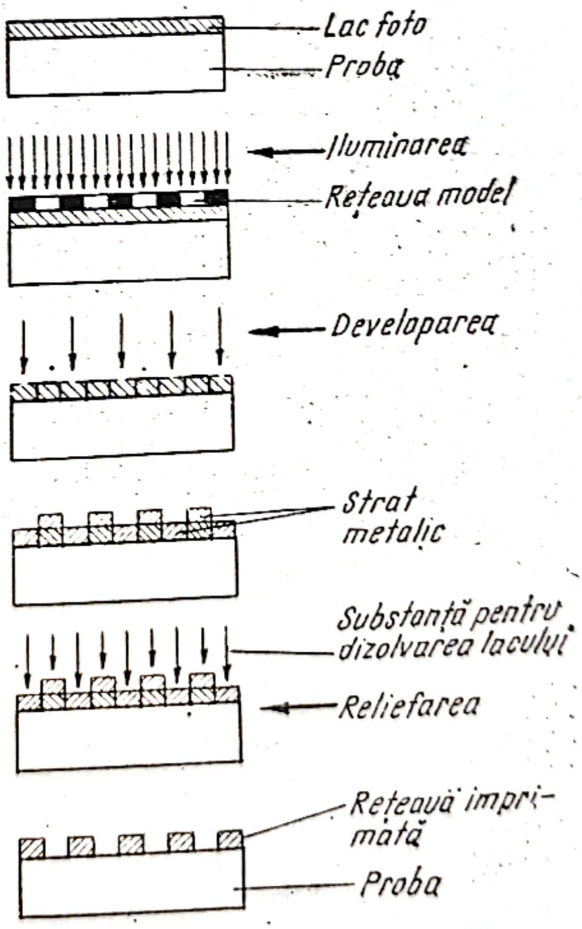


Fig. 5.48.

Scanned with OKEN Scanner

Depunerea lacului se poate face și cu ajutorul unei pensule cu păr foarte fine — modelul avînd o poziție înclinată — începînd de la partea superioară a modelului. Suprafața acoperită cu lac trebuie să fie sensibil mai mare decît suprafața etalon pe care se aplică rețeaua.

După ce se aplică rețeaua pe model acesta se ilumineză după care se face developarea.

Pentru expunere poate fi utilizată orice sursă de lumină bogată în radiații ultraviolete. Se recomandă folosirea unui bec COLORTRAN de 500 W supravoltat, plasat la o distanță de circa 3 m de suprafața modelului. Fiindcă durata de expunere depinde de mai mulți factori (grosimea și compoziția lacului fotosensibil, frecvența rețelei ș.a) este necesar să se facă încercări preliminare în vederea stabilirii corecte a acesteia, cunoscînd că:

— dacă durata de expunere este prea scurtă, lacul fotosensibil se desprinde cu ocazia spălării suprafeței cu triclor-etilen, iar

— dacă durata este prea lungă rețeaua imprimată este mai puțin contrastată, datorită fisurilor produse în lacul fotosensibil.

În timpul expunerii este necesar ca rețeaua să fie în contact perfect cu suprafața fotosensibilă a modelului. În acest scop, înainte de expunere,

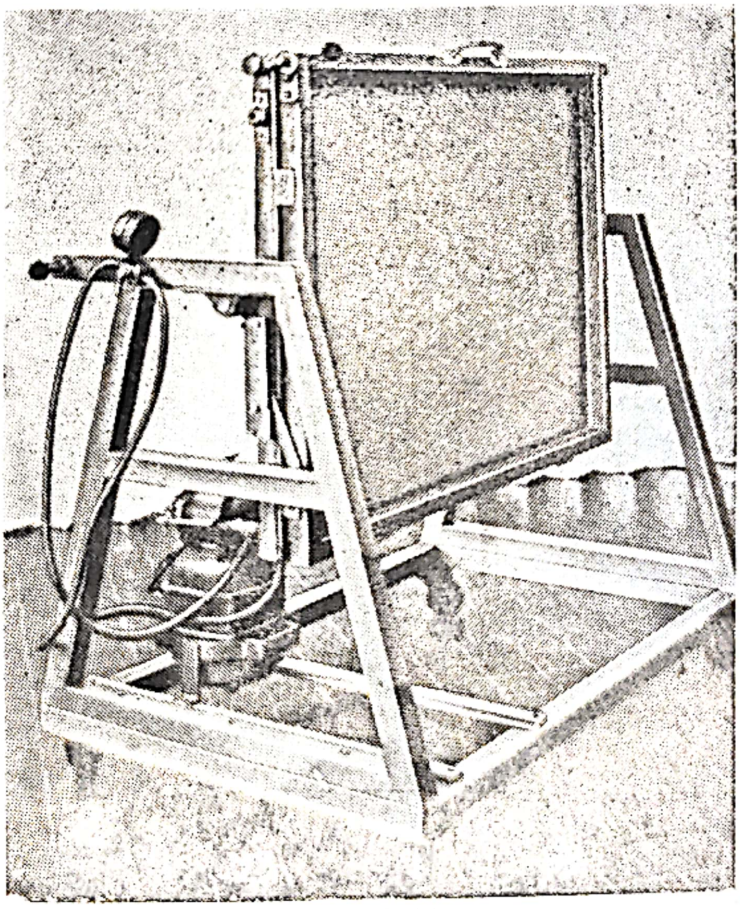


Fig. 5.49.

modelul împreună cu rețeaua sînt introduse într-o cutie pneumatică cu pereții din foi subțiri de plexiglas (1 mm grosime) din care, cu ajutorul unei pompe pneumatice, este evacuat aerul (fig. 5.49).

Scanned with OKEN Scanner

În cazul metalelor, mai ales, reţeaua imprimată este greu vizibilă. Punerea ei în evidenţă se poate face cu ajutorul unui colorant special, cum este colorantul *Resifax*, cu care se acoperă întreaga suprafaţă etalon. După circa 30 de secunde se elimină excesul de colorant cu ajutorul unui jet de apă, puţin violent, pentru a nu desprinde reţeaua de lac polimerizat. Uscarea suprafeţei se poate face fie în aer liber, fie într-un jet de aer cald.

Se depune, apoi — prin metalizare în vid înalt — un strat de metal cu grosimea de cca 30 μm, după care se aplică o soluţie pentru dizolvarea lacului, rămînînd relieful reţelei.

O instalaţie de metalizare la vid înalt, care a dat bune rezultate la confecţionarea reţelelor în laborator este prezentată în lucrarea [104].

Utilizarea reţelelor transferabile (reţele-mărci). O largă utilizare au căpătat-o, în ultimii ani, aşa-numitele *reţele transferabile* (reţele-mărci). Tehnica de aplicare pe model a acestor reţele fiind arătată în fig. 5.50. În timp ce la procedeul prin copiere originalul reţelei se aplică pe model

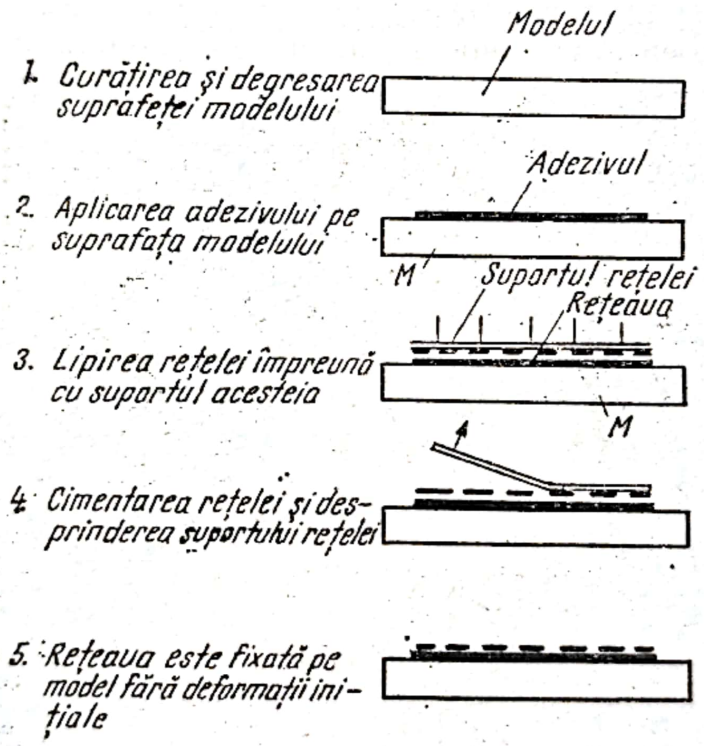


Fig. 5.50.

prin contact mecanic, la procedeul de transfer reţeaua este transferată de pe un suport auxiliar pe model [99].

Aceste reţele pot fi confecţionate, pe linie industrială, pe suportul auxiliar în condiţii ideale. După lipirea reţelei pe modelul ce face obiectul cercetării suportul auxiliar se detaşează, după ce adezivul s-a întărit. La această metodă se utilizează filme, de obicei, detaşabile cum sînt cele de fabricaţie Kodak Kodalith. Acestea sînt pe bază de acetat, unde liantul dintre film şi stratul de gelatină sensibilă este slab şi poate fi uşor înlătu-

Scanned with OKEN Scanner

rat. Reproducerea reţelei pe film se execută direct prin contact. Dacă reţeaua imprimată este în cruce, cum se întîmplă în majoritatea cazurilor, atunci prima reproducere reprezintă imaginea negativă a reţelei principale. Din reproducerea imaginii negative pe un film de acelaşi tip va rezulta reţeaua ce poate fi imprimată pe model.

Filmul, după uscare, se fixează cu adeziv pe suprafaţa pregătită a modelului (cu stratul sensibil aplicat pe suprafaţa acestuia).

Ca adeziv se recomandă răşină epoxiplastificată sau adezivul Eastman. Pentru a se realiza o lipire perfectă, şi în strat uniform, peste reţea se aşază o foaie de cauciuc şi se încarcă progresiv cu o sarcină de 0,5 — — 1,0 daN/cm², După ce adezivul s-a uscat complet (circa 24 de ore) suportul filmului se scoate, prin deslipire lentă, pentru a rămîne aplicat pe suprafaţa modelului numai stratul subţire de gelatină sensibilă fixată de adeziv.

Puterea separatoare a reţelelor de transfer realizată pe filmul Kodak Kodalith este însă limitată. Zandman [101] utilizează reţele din nichel care se fabrică pe scară industrială cu pasul de $\frac{1}{80}$ mm, dar numai în formatul de 25 × 25 mm². Reţelele cu lacuri fotografice — cu o frecvenţă mare a liniilor — pot fi transferate în condiţii favorabile de pe folii de poliester cu ajutorul răşinilor epoxidice [63] pe modele din material plastic.

Foliile de poliester se comportă bine, ca suporţi auxiliari, cu menţinerea dimensiunilor iniţiale, din care cauză, la ora actuală, pentru reţelele metalice — care au o frecvenţă de 100 linii/mm în format de 50 × × 50 mm² — acestea se utilizează, aproape, în exclusivitate [70]. Se subliniază că aceste reţele pot fi utilizate numai la temperaturi sub 200°C din cauza stabilităţii limitate a adezivului.

În S.U.A. şi în unele state europene, se confecţionează reţele-mărci. Aplicarea lor pe suprafaţa piesei se face după tehnologia arătată în fig. 5.50. Acestea sînt standardizate cu pas de: $\frac{1}{8}$; $\frac{1}{40}$ şi $\frac{1}{80}$ mm şi mărime de: 100 × 100 mm² şi 250 × 250 mm² şi sînt realizate dintr-un suport metalic inoxidabil, cu grosimea de circa 0,1 mm, peste care se aplică o peliculă pe care este imprimată reţeaua.

Realizarea reţelelor imprimate prin gravare. Dacă măsurarea deformaţiilor se face la temperaturi înalte şi foarte înalte, singura metodă care dă rezultate este metoda gravării. În acest caz, pentru sporirea calităţii franjelor moiré, suprafaţa modelelor trebuie supusă unui tratament suplimentar care constă din depunerea electrică a unui alt metal, decît al modelului, pe fantele deschise ale reţelei. În cazul modelelor din oţel suprafaţa etalon trebuie, mai întîi, placată, cu nichel şi apoi se reproduce pe ea reţeaua utilizînd procedeul Kodak Photo Resist (KPR) prezentat în lucrarea [41]. Apoi urmează depunerea electrică a cuprului pe zonele neexpuse (unde, aşa cum s-a arătat lacul a fost înlăturat prin spălare), eliminarea completă a lacului KPR şi oxidarea cuprului pentru înnegrirea

Scanned with OKEN Scanner

liniilor reţelei. În urma acestor operaţii se obţine o reţea cu un contrast satisfăcător, care ajută la producerea unor franje moiré, de bună calitate, chiar la temperaturi foarte ridicate, apropiate de temperatura de fuziune a metalului.

În fig. 5.51 se prezintă principalele faze ale tehnologiei aplicate la realizarea acestor reţele.

La Laboratorul Central de Poduri şi Şosele din Paris gravarea reţelelor se face pe cale chimică : compoziţia soluţiei utilizate în acest scop

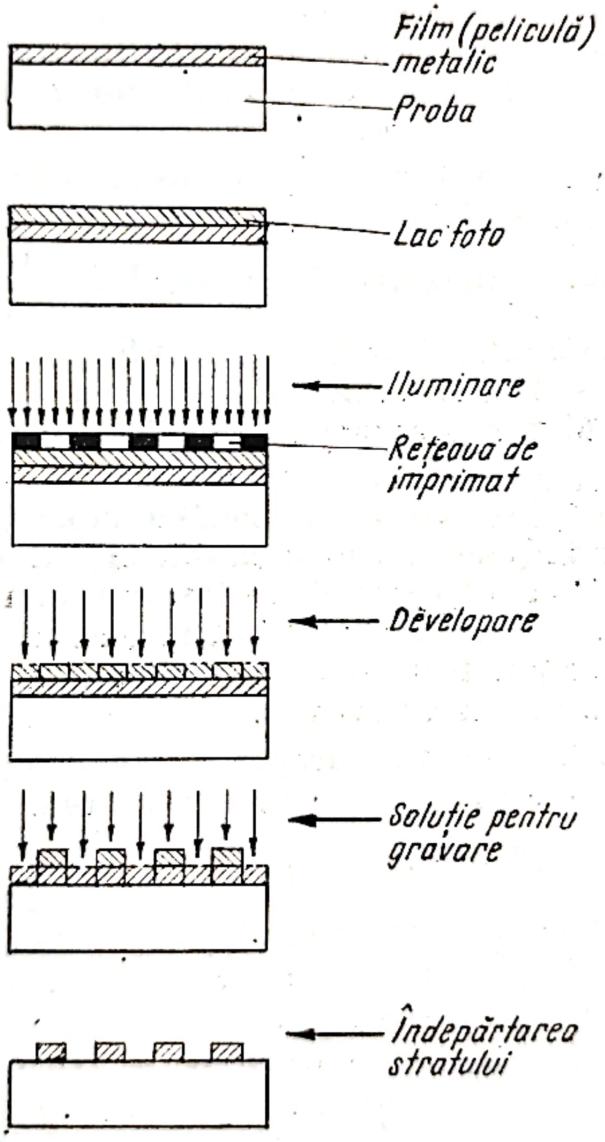


Fig. 5.51.

depinde de metalul din care este făcut modelul. În cazul duraluminului se obţin bune rezultate cu următoarea compoziţie :

Acid ortofosforic	250 cm³
Apă	1 000 cm³
Florură de sodiu	20 g

Scanned with OKEN Scanner

Această soluție este ușor proiectată pe rețeaua imprimată pe model — după tehnica prezentată la § 5.3.1 — pînă cînd lacul polimerizat începe să se desprindă de model. Atunci trebuie să se oprească imediat jetul cu soluție și să se facă o clătire abundentă în apă a suprafeței modelului și apoi curățirea acesteia cu o perie fină pentru eliminarea completă a lacului. Dacă mai rămîn urme de lac acestea vor fi eliminate cu tricloretilen. Suprafața etalon este astfel gravată cu rețeaua care, inițial, a fost imprimată prin fotocopiere.

În cazul modelelor din oțel se procedează după cum urmează : suprafața modelului se atacă, mai întîi, circa 2 minute, cu o soluție avînd următoarea compoziție :

— apă	500 cm³
— acid clorhidric	50 cm³

apoi se continuă circa 4 minute cu :

— apă	500 cm³
— acid clorhidric	25 cm³
— bisulfit de sodiu	50 cm³

după care, suprafața se curăță cu :

— apă	1 000 cm³
— acid acetic	2 cm³

Se recomandă ca, înainte de gravare, regiunile vecine suprafețe etalon să fie protejate, de exemplu, prin acoperire cu un lac de cauciuc, pentru a nu fi atacate de soluțiile de mai sus.

Realizarea rețelelor martor (de referință). Originalele rețelelor realizate prin procedeele menționate mai sus, de obicei, nu se utilizează ca rețele martor. De regulă copiile acestora pe plăci foto sau pe filme servesc ca rețele de referință (martor). Materialelor foto utilizate în acest scop li se pretinde o putere de separare foarte ridicată și o bază care să-și mențină dimensiunile inițiale. Literatura de specialitate recomandă-aproape fără iexcepție — utilizarea, în acest scop, a plăcilor foto Kodak Maximum Resolution — Platte [44], [45] sau filmul ORWO-DK5 — produs în R.D.G. cu care pot fi copiate rețele pînă la o frecvență de 250 linii/mm. Față de plăcile foto filmul prezintă avantajul că avînd o greutate proprie mică, poate fi utilizat cu ușurință în cazul suprafețelor cu poziție verticală.

O putere separatoare maximă — peste 1000 linii/mm — o are placa ORWO, specială pentru holografie LP_2 și ORWO, LO2 [3]. Detalii în legătură cu utilizarea acestor plăci, a căror strat foto are o granulație foarte fină $< 0{,}1$ μm, sînt cuprinse în lucrarea [42]. O privire de ansamblu asupra progreselor realizate în legătură cu straturile foto cu argint+ + gelatină utilizate pentru obținerea rețelelor martor cuprinde lucrarea [104].

5.3.2. PREGĂTIREA MODELELOR

Modelele ce fac obiectul cercetării se decupează, supradimensionat, după care se prelucrează la dimensiunile finale. În cazul modelelor dreptunghiulare, solicitate la întindere, se dă fețelor laterale o ușoară înclinare,

Scanned with OKEN Scanner

de circa 2 %, pentru a se obține o secțiune transversală minimă la mijlocul lungimii probei. Fețele laterale ale probei se racordează cu o rază $R \approx \approx 3b$, b fiind lățimea probei. În felul acesta s-a creat la mijlocul probei o secțiune minimă (care va fi secțiunea de rupere), fără introducerea unui concentrator de eforturi, de valoare apreciabilă, care să influențeze distribuția tensiunilor în această secțiune. Axa longitudinală a probei — după care acționează sarcina — în cazul probelor din laminate, va fi astfel aleasă încît să coincidă cu direcția de laminare a tablei din care a fost luată proba.

Proba este adusă la grosimea prevăzută prin prelucrări mecanice, ultimul strat, de 0,25 mm grosime, urmînd a fi înlăturat prin polizare, cu viteză redusă, cu ajutorul unei pietre de polizor poroase și bine unsă, pentru a se evita încălzirea probei și introducerea unor tensiuni superficiale. Ulterior suprafața probei, pe care urmează să fie imprimată rețeaua (suprafața etalon), se polizează cu o piatră de polizor cu granulație fină (nr. 1 sau 2) după care se lustrește cu pastă de diamant. În felul acesta se obține o suprafață etalon, plană și bine finisată, fără zgîrieturi sau alte imperfecțiuni. Înainte de imprimarea rețelei pe suprafața etalon, aceasta este degresată cu vată îmbibată în apă și pudră de carbonat de calciu natural, pînă în momentul cînd apa formează deasupra modelului un film regulat, fără discontinuități. Apoi suprafața se usucă într-un curent de aer cald, fiind astfel pregătită pentru sensibilizare în vederea imprimării rețelei.

5.3.3. EFECTUAREA ÎNCERCĂRII

Mașina universală, la care se face încercarea probelor, sau instalația de încărcare utilizată, trebuie să fie prevăzută cu dispozitive de prindere a probei, special concepute pentru a fi asigurată solicitarea axială a acesteia.

Alinierea probei în fălcile mașinii de încercat se verifică prin încărcarea probei pînă aproape de limita de elasticitate. Dacă franjele moiré apărute, la diferite trepte de încărcare, în regiunea fără concentratori de eforturi, sînt paralele, înseamnă că alinierea (axialitatea sarcinei), este realizată.

Viteza de creștere a sarcinii, în timpul încercării, trebuie să fie redusă și constantă în tot cursul încercării, făcîndu-se întreruperi la trepte egale de încărcare, pentru fotografierea cîmpului de franje, corespunzător stării de deformație produsă de încărcarea respectivă .

Viteza de încărcare — în domeniul elastic — poate fi controlată cu ajutorul vitezei apariției franjelor, fiind proporțională cu viteza de creștere a frecvenței acestora.

5.3.4. OBȚINEREA ȘI FOTOGRAFIEREA FRANJELOR MOIRÉ

Obținerea și fotografierea franjelor moiré se poate face fie prin suprapunerea rețelei martor peste rețeaua deformată, la fiecare treaptă de încărcare a modelului și fotografierea cu ajutorul unui aparat fotografic obișnuit a franjelor rezultate, fie prin fotografierea la fiecare treaptă de

Scanned with OKEN Scanner

încărcare a rețelei deformate cu un aparat fotografic de mare precizie, iar franjele moiré se obțin, ulterior, suprapunînd rețeaua martor pe placa fotografică a rețelei deformate.

Fotografierea directă a franjelor. Rețeaua martor din sticlă este plasată în fața suprafeței etalon a modelului cu ajutorul unui dispozitiv (fig. 5.52) care permite reglarea fină a poziției rețelei RM. Aceasta este fixată de o bară de duraluminiu prinsă prin două șuruburi. *A* de piesele *B* ce sînt fixate de modelul montat în mașina de încercat. Piesele *C* asigură o bună aplicare a rețelei martor pe rețeaua deformată. Modelul și franjele moiré rezultate sînt luminate de lumina reflectată a unor becuri electrice plasate aproape de obiectivul aparatului, care nu sînt aprinse decît în timpul expunerii, pentru a se evita încălzirea modelului și a rețelei RM. În cazul modelelor metalice se recomandă ca iluminarea să se facă prin lumină indirectă pentru a nu da reflexii.

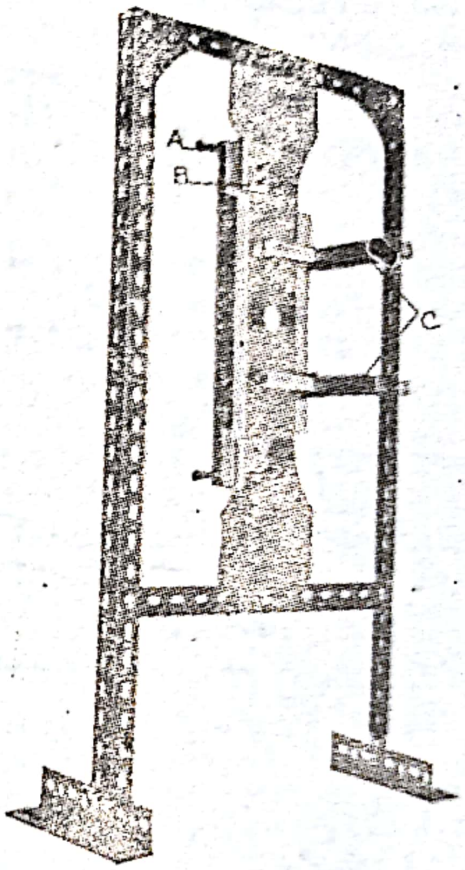


Fig. 5.52.

Pentru înregistrarea franjelor se utilizează plăci sau filme fotografice. Aparatul fotografic utilizat trebuie să aibă distanța focală suficient de mare, pentru a permite executarea fotografiilor la scara 1/1 sau 2/1, iar punerea la punct a clarității imaginii să se efectueze pe ecran mat cu granulație ultrafină. Pot fi folosite, în acest scop, cu bune rezultate, aparatele de fotoreproducere utilizate în poligrafie.

Variația intensității luminoase a rețelei — de care depinde contrastul franjelor — este în funcție de reflectanța metalului de bază și de intensitatea și uniformitatea iluminării. Întrucît, în majoritatea cazurilor, aceste condiții nu sînt optime, franjele rezultate prezintă un contrast relativ slab, din care cauză se recomandă utilizarea unor materiale fotografice de mare contrast și sensibilitate. Filmele sau plăcile ortocromatice din seria litografică (ca de exemplu seria Kodalith) au o mare sensibilitate și un contrast satisfăcător. Plăcile fotografice sînt indicate în cazurile unde stabilitatea dimensiunilor și așezarea precisă a rețelei sînt de extremă importanță, în timp ce filmele, cu bază de poliester sînt adecvate tuturor aplicațiilor curente ale franjelor moiré, deoarece prezintă rezistență foarte mare la întindere, din care cauză asigură o bună stabilitate dimensională în cazul unui suport flexibil.

În cazul încercărilor la temperaturi ridicate, cu acest procedeu, imaginea rețelei imprimată prin gravare se proiectează în mărime naturală pe ecranul de geam mat al unui aparat fotografic, unde se suprapune peste rețeaua martor pentru obținerea franjelor corespunzătoare stării de deformație.

Scanned with OKEN Scanner

Acest procedeu, prezentat schematic în fig. 5.53 a, prezintă următoarele dezavantaje :

— dacă se produc unele deplasări într-o direcție perpendiculară pe planul suprafeței modelului, va rămîne un spațiu între cele două rețele, din care cauză se produc erorile arătate la § 5.4.1 ;

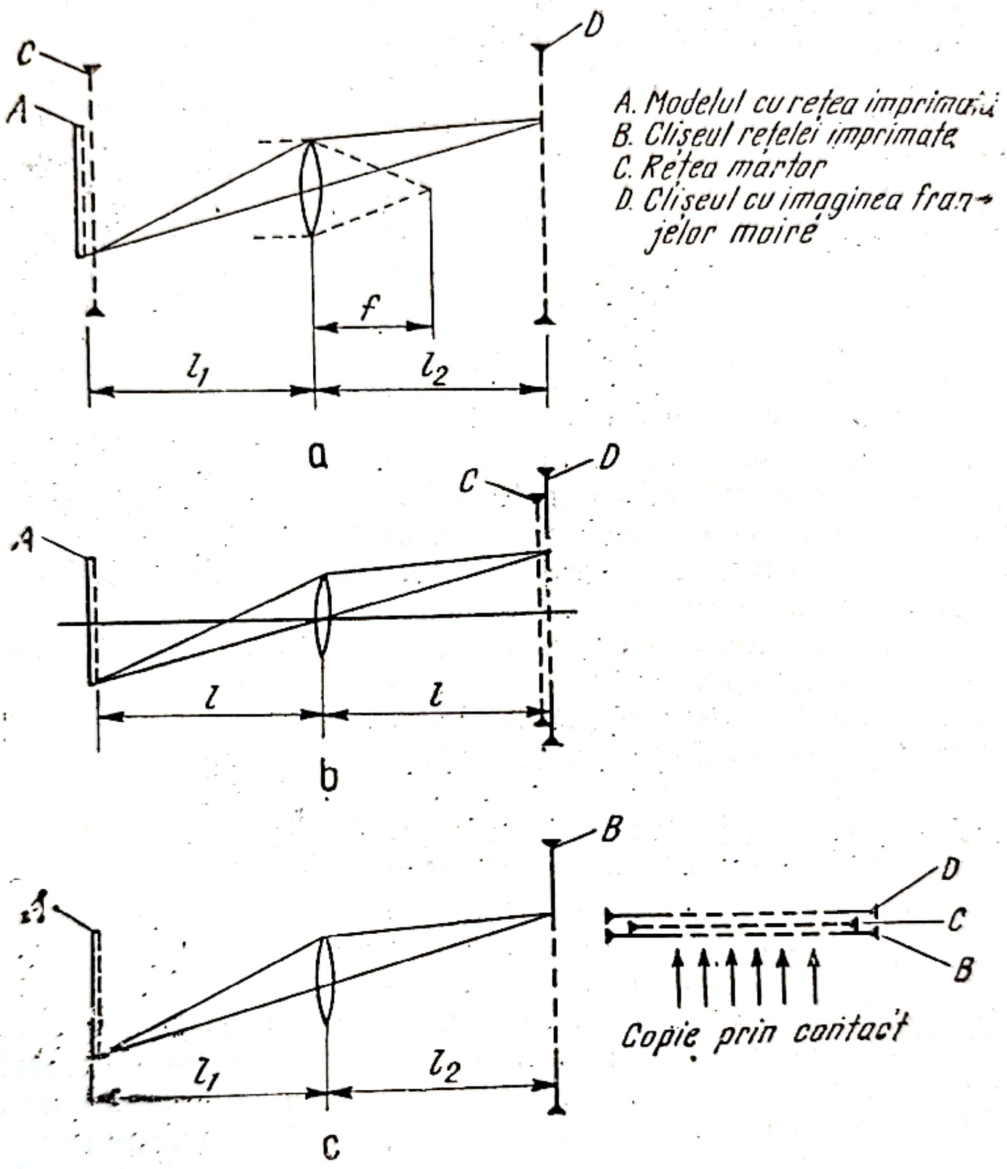


Fig. 5.53.

— este incomod în cazul cînd rețeaua RM trebuie suprapusă în două poziții (orizontală și verticală) pentru obținerea a două familii de franje (corespunzătoare deplasărilor u și v, după cele două direcții principale);

— nu poate fi utilizat în cazul solicitărilor dinamice.

Fotografierea rețelei deformate. Dezavantajele prezentate de primul procedeu sînt înlăturate dacă se fotografiază, mai întîi, rețeaua deformată și peste imaginea acesteia se suprapune rețeaua *RM* (fig. 5.53). În acest caz pentru fotografierea rețelei deformate și a franjelor este nevoie de un

Scanned with OKEN Scanner

aparat fotografic de mare precizie, cu putere de separare foarte ridicată și dotat cu un sistem de reglaj foarte fin.

După obținerea unei reproduceri fotografice, la scara de 1 :1 a rețelei deformate, se produc două familii de franje prin suprapunerea rețelei RM, o dată cu liniile paralele la axa Ox și încă o dată cu liniile paralele cu axa Oy. Această operație se execută comod și precis cu ajutorul dispozitivului despre care s-a vorbit la § 5.3.1 și care este prezentat în lucrarea [40]. În timpul expunerii, care în cazul unei iluminări bune a suprafeței modelului — la ambele procedee este de ordinul a 20 secunde — este foarte important ca stabilitatea aparatului fotografic să fie asigurată, acesta trebuind să fie bine izolat contra vibrațiilor.

În general, se recomandă ca timpul de expunere să fie astfel ales încît să se poată obține fotografii puțin subexpuse, care să pună în evidență părțile cele mai întunecate ale franjelor.

Fotografierea în etape a celor două rețele. Un alt procedeu, mai puțin utilizat în practică, constă în imprimarea, mai întîi, pe placa fotografică a rețelei martor și apoi, se expune, pe aceeași placă, imaginea rețelei imprimate pe modelul deformat. După developare se obține direct imaginea franjelor moiré (fig. 4.53, c).

Aplicație. În fig. 5.54 se dă un exemplu comparativ de franje moiré obținute prin procedeele prezentate schematic în fig. 5.53, a 5.53, b și 5.53, c utilizînd același material fotografic și aceleași condiții de iluminare

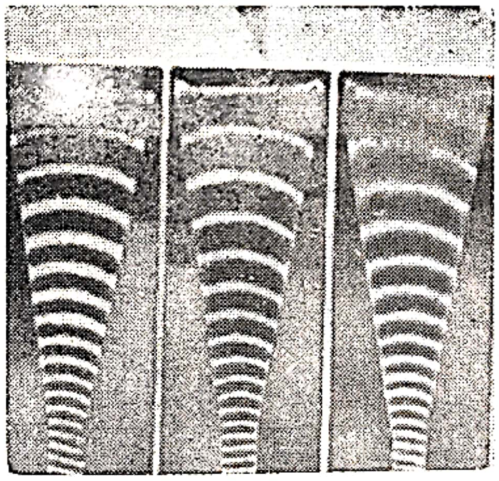


Fig. 5.54.

Modelul a fost realizat din cauciuc uretanic, pe care a fost imprimată o rețea cu frecvența de 4 linii pe mm și a fost supus unei deformații specifice, relativ mare, de 7 %. Se observă că franjele cele mai clare sînt cele obținute prin fotografierea rețelei deformate și suprapunerea, peste acestea, a rețelei martor (procedeul prezentat schematic în fig. 5.52).

5.3.5. MĂSURAREA INTERFRANJEI

Precizia metodelor tensometrice bazate pe fenomenul moiré depinde, în mare măsură, de precizia cu care poate fi determinat centrul franjelor. În cazul deformațiilor mari (mai mari de 1 %), măsurătorile executate cu

Scanned with OKEN Scanner

ajutorul unui microscop mobil obișnuit, au de obicei, suficientă precizie. Dacă deformațiile sînt mai mici de 1 % este nevoie să se determine centrul interfranjelor cu o precizie mai mare decît cea obținută pe această cale.

Ochiul reprezintă un mijloc nepotrivit pentru aprecierea centrului franjei, deoarece el este astfel creat încît încearcă să compenseze în mod automat orice variație de intensitate luminoasă. În consecință, se întîmpină mari greutăți la determinarea centrului unei franje — care este un produs al luminii — atunci cînd această determinare se bazează pe variația intensității luminoase.

Din această cauză, în cazul deformațiilor mici, pentru măsurarea interfranjei se utilizează dispozitive speciale.

În lucrarea [56] este prezentat un astfel de dispozitiv. Măsurarea pantelor curbelor $u(x, y)$ și $v(x, y)$ în vederea determinării deformațiilor specifice prin derivare grafică (v. p. 5.2.5) se face cu bune rezultate cu

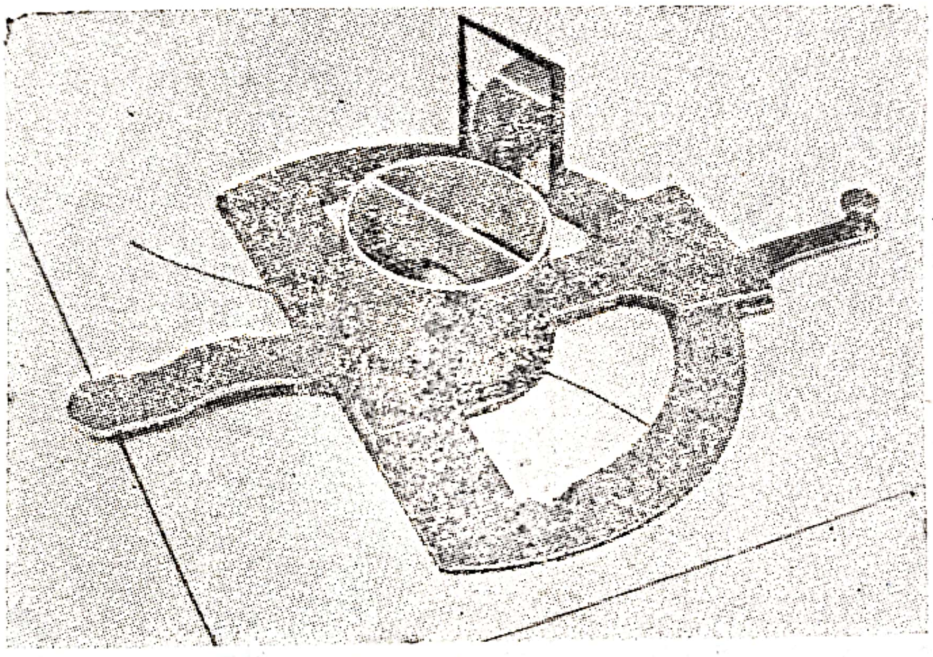


Fig. 5.55.

ajutorul dervmetrului prezentat în fig. 5.55. Cu acesta pot fi apreciate unghiuri de circa 2.10^{-1} grade.

În ultimii ani s-au construit dispozitive semiautomate, și automate pentru măsurarea interfranjei. În fig. 5.56 se prezintă schema unui dispozitiv semiautomat, care, în principal, este format dintr-un car prevăzut cu două traverse, A (pentru deplasarea după direcția Ox) și B (pentru deplasarea după direcția Oy), care poartă placa fotografică C cu imaginea franjelor moiré. O sursă de lumină colimată, așezată la baza dispozitivului, trimite raze luminoase prin placa fotografică, unui sistem optic focalizat pe o celulă solară de siliciu D. Această celulă produce o tensiune proporțională cu intensitatea luminii ce cade pe ea, astfel că atunci cînd carul traversează placa cu franjele moiré, prin lumina colimată se obține de la celulă o tensiune variabilă, care se transmite unui înregistrator de hărți mobil E cu peniță de trasare, în timp ce mișcarea carului comandă viteza

de trasare a conturului de hartă executat de înregistrator. Comanda mișcărilor se face cu ajutorul cutiei de comandă *F*.

În felul acesta de pe placă fotografică cu imaginea franjelor moiré se obține un grafic trasat prin puncte de intensitate luminoasă, în funcție de distanță. Scara intensității luminoase este amplificată electric, iar scara distanțelor parcurse este amplificată mecanic. Prin selectarea vîr-

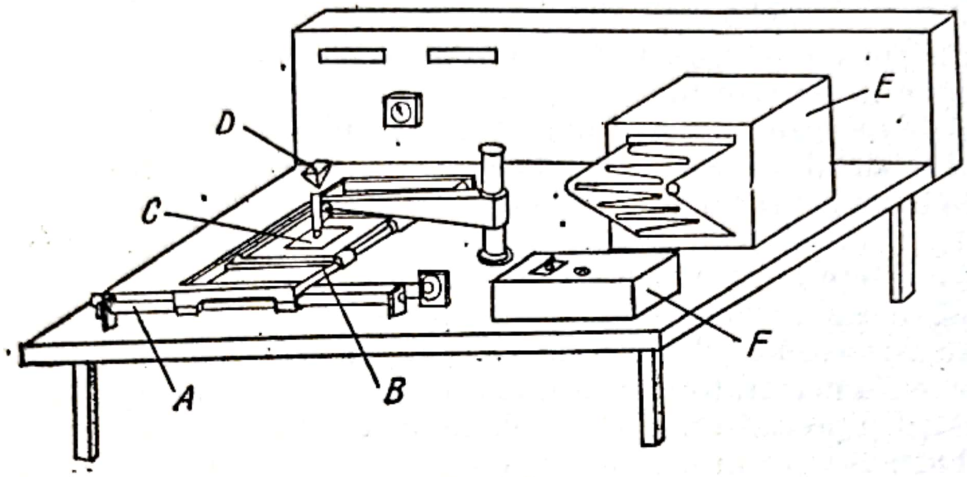


Fig. 5.56.

furilor de intensitate luminoasă se obține al doilea grafic ce exprimă numărul franjelor în funcție de distanță.

Instalația prezentată poate fi complet automatizată, dacă mecanismul de deplasare este echipat cu dispozitiv de convertire analogic-numeric, astfel încît să se poată obține un rezultat complet electric. În acest caz, se va putea obține o curbă analogică a numărului franjelor în funcție de distanță și atașa un polinom unei asemenea curbe, care va putea fi derivat pentru a obține direct componentele deformațiilor [38].

5.4. PRECIZIA METODELOR TENSOMETRICE BAZATE PE FENOMENUL MOIRÉ

5.4.1. FACTORII CARE INFLUENȚEAZĂ PRECIZIA METODEI

Frecvența rețelelor a) *Cazul rețelelor cu același pas.* S-a arătat că sensibilitatea și precizia măsurării deformațiilor cu ajutorul franjelor moiré depind, în primul rînd, de frecvența liniilor rețelelor utilizate. Cu cît frecvența este mai mare, deci pasul rețelei mai mic, cu atît precizia metodei este mai mare. Astfel, în cazul cînd se utilizează rețele de același pas, dacă pasul celor două rețele este $p = \frac{1}{20}$ mm, pentru o interfranjă $f = 10$ mm, corespunde o deformație specifică (relația 5.24):

$$\varepsilon = \frac{p}{f} = \frac{1}{20 \cdot 10} = 5 \cdot 10^{-3}$$

Scanned with OKEN Scanner

iar dacă $p = \frac{1}{50}$ mm, pentru aceeași interfranjă, corespunde $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$.

Pentru deformații în domeniul plastic, unde în cazul oțelurilor se ating deformații specifice liniare de ordinul a 10^{-2} și mai mari, această sensibilitate este satisfăcătoare. De exemplu, pentru $\varepsilon = 10^{-2}$, utilizînd rețele cu pasul $p = \frac{1}{50}$ mm, corespunde o interfranjă $f = 2$ mm. Franjele fiind suficient de dese, permit cunoașterea, cu bună continuitate, a stării de tensiune în diverse puncte ale modelului.

Mărimea pasului rețelei depinde și de materialul din care este confecționat modelul. De exemplu, în cazul materialelor plastice se pot obține rezultate bune pentru măsurări în domeniul elastic cu o rețea avînd pasul pînă la 1/20 mm, spre deosebire de oțeluri care, așa cum s-a văzut mai sus, reclamă o finețe mult mai mare a rețelei.

Dacă în cazul deformațiilor specifice mici, cum sînt cele din domeniul elastic, se utilizează rețele cu același pas, franjele vor fi mult mai distanțate și deci precizia măsurătorilor va fi mai redusă. Ca urmare, pentru sporirea sensibilității și preciziei metodei trebuie utilizate rețele cu frecvențe mari. În cazul ideal se pot utiliza rețele pe bază de difracție care au o frecvență mult mai mare decît rețelele obișnuite. Utilizarea acestor rețele la analiza franjelor moiré întîmpină o serie de greutăți. Cea mai mare constă în transferul configurației rețelei de la rețeaua martor la rețeaua imprimată pe model *). De menționat că în cazul rețelelor pe bază de difracție, avînd o frecvență mare (de ordinul a cîteva sute pe mm), nu se poate realiza o bună reproducere fotografică, cu contrast suficient, în condiții normale de iluminare și observație. În plus, costul acestora este foarte ridicat, considerat prohibitiv pentru cercetările tensometrice curente.

b) *Cazul rețelelor cu pas diferențiat.* În cazul deformațiilor mici, sub 10^{-3} (ce corespunde, în cazul rețelelor simple cu $p = \frac{1}{50}$ mm, la o interfranjă f = 20 mm) pentru ca măsurarea să se poată face cu precizie suficientă este indicată utilizarea rețelelor cu pas diferențiat.

Prin utilizarea rețelelor cu pas diferențiat, sensibilitatea metodei crește foarte mult (v. § 5.2.7). În acest caz deformația specifică ε poate fi evaluată pe lungimea etalon f, dacă se poate determina Δf (diferența dintre interfranja inițială f și interfranja f' rezultată după deformarea modelului).

Din relațiile stabilite la § 5.2.7, rezultă

$$\varepsilon = \frac{p\,\Delta f}{f \cdot f'} = K \frac{p}{f}. \tag{5.42}$$

Deci, în cazul rețelelor cu pas diferențiat, pentru aceeași interfranjă ca în cazul rețetelor de același pas, corespunde o deformație specifică mai mică, factorul de micșorare fiind $K = \frac{f}{f'}$.

*) Modul de obținere a acestor rețele și tehnica de lucru, sînt prezentate în lucrarea [97].

Scanned with OKEN Scanner

Sensibilitatea este funcţia de cea mai mică valoare a lui $\Delta f = f' - f$, ce poate fi măsurată, practic, care la rîndul său depinde de finețea franjelor.

Astfel, de exemplu, pentru $p = \frac{1}{50}$ mm, $f = 10$ mm și $\Delta f = f' - f = 0{,}5$ mm, corespunde o deformaţie specifică

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{50} \cdot 0{,}5}{10 \cdot 10{,}5} = 10^{-4}.$$

Dacă s-ar utiliza reţele cu același pas ($p = \frac{1}{50}$, $\Delta f = 0$) deformaţia specifică corespunzătoare aceleiași interfranje ($f = 10$ mm) este

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{50}}{10 \cdot 10{,}5} = 2 \cdot 10^{-3}$$

deci sensibilitatea în acest caz, s-a micșorat de 20 de ori față de cazul cînd se utilizează rețelele cu pas diferențiat, menționate mai sus.

Mărirea sensibilităţii, în cazul utilizării reţelelor cu pas diferenţiat, este ilustrată în fig. 5.57 unde se dau valorile deformaţiei Δl, măsurată

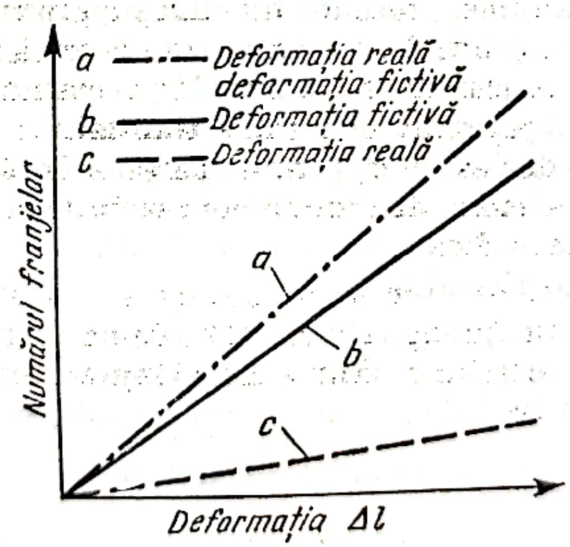


Fig. 5.57.

în funcţie de numărul de franje, în cazul utilizării reţelelor cu pas diferenţiat (curba *a*) în comparaţie cu deformaţia reală (curba *c*) și cu deformaţie fictivă, corespunzătoare franjelor iniţiale, cauzate de diferența dintre pasurile reţelelor (curba *b*).

Scanned with OKEN Scanner

Același lucru este pus în evidență și de fig. 5.58 în care sînt arătate franjele moiré în cazul unui disc din material plastic supus unei compresiuni pe direcția diametrală [40].

În fig. 5.58, a sînt arătate franjele obținute cu rețele de aceeași frecvență, $f = 40$ linii/mm, iar în fig. 5.58, b franjele obținute cu o rețea imprimată cu $f = 20$ linii/mm și o rețea martor cu f = 20 ,05 linii/mm ($\lambda = 0{,}05$ mm).

În fig. 5.59 se dau, pentru $f = 10$ mm, valorile lui Δf stabilite în funcție de ε, cu relația (5.42), pentru diferite valori ale pasului p al rețelei imprimate. Se observă că sensibilitatea, deci precizia măsurării, crește cu atît mai rapid cu cît rețeaua utilizată are pasul mai mic. De exemplu, pentru $\varepsilon = 10^{-3}$, Δf are valoarea de 4 mm dacă $p = \frac{1}{30}$ mm, și de 10 mm dacă $p = \frac{1}{50}$ mm și tinde către infinit pentru $p = \frac{1}{200}$ mm.

c) *Cazul franjelor moiré de ordinul doi.* La paragraful 5.2.8 s-a arătat că franjele moiré de ordinul doi sînt linii de egală valoare a deformațiilor specifice ε_x, respectiv ε_y și că distanța dintre două franje succesive corespunde la o variație a deformației specifice de $\frac{p}{\Delta x}$, respectiv $\frac{p}{\Delta y}$. Translațiile Δx și Δy sînt stabilite astfel încît distanța dintre franjele moiré de ordinul doi să corespundă la o valoare predeterminată a deformației specifice.

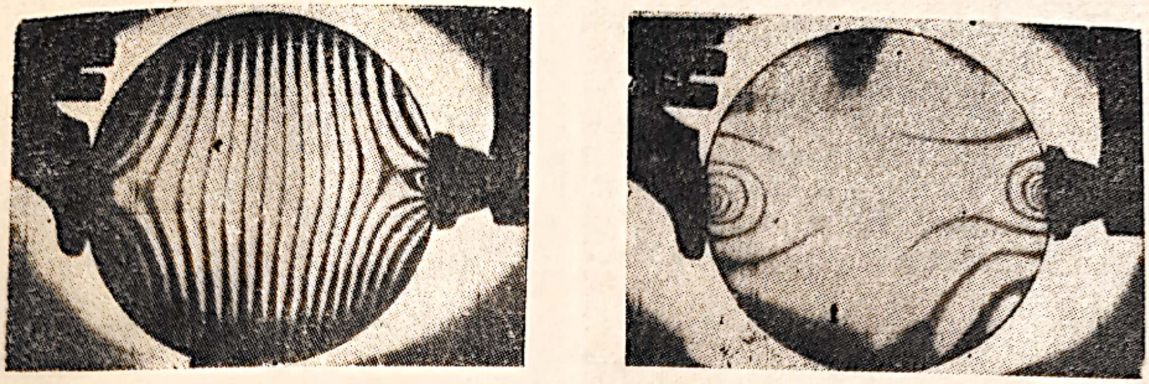
Dacă obținerea franjelor moiré de ordinul doi se realizează prin suprapunerea a două filme, grosimea filmului suprapus are un efect negativ asupra calității franjelor, deci inclusiv asupra preciziei metodei. Pentru înlăturarea acestui inconvenient Dantu [17] recomandă următorul procedeu: imaginea franjelor moiré inițiale este mărită și fotografiată pe un film fixat într-un dispozitiv ce permite translații orizontale și verticale. Se obține astfel, pe același film, suprapunerea a două imagini. Imaginea fiind mărită, franjele moiré de ordinul doi rezultate vor fi mai distanțate, deci precizia este mai ridicată.

Relațiile (5.33) sînt aproximative, deoarece au fost obținute neglijînd puterile superioare ale lui Δy. Dantu [17] demonstrează că dacă, în loc de o translație Δy a filmului cu franje moiré inițiale, se fac două translații simetrice $+\frac{\Delta y}{2}$ și $-\frac{\Delta y}{2}$, se elimină termenul cu Δy^2, deci precizia metodei crește.

Utilizarea metodei este indicată numai în cazul cînd franjele de ordinul întîi au frecvență mare.

Precizia măsurătorilor, mai ales cînd se lucrează cu rețele cu pas diferențiat, este influențată și de calitatea franjelor. Cu cît acestea sînt mai subțiri cu atît precizia este mai mare. Calitatea franjelor este influențată,

Scanned with OKEN Scanner



a) b)

Fig. 5.58.

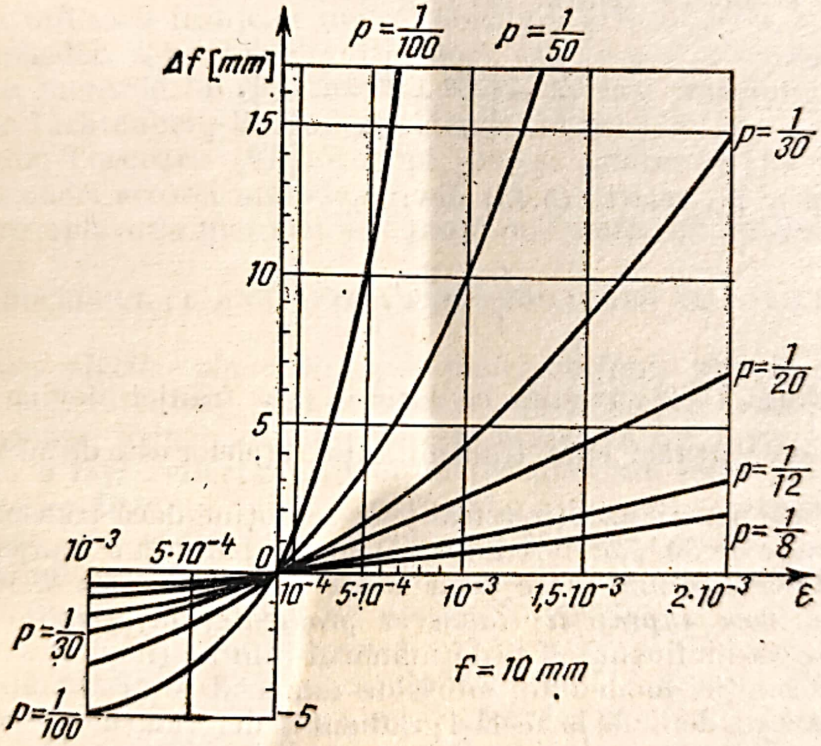


Fig. 5.59.

așa cum demonstrează *Zandman* ș.a. [106] și *Theocaris* [97], de transmitanțele celor două rețele, a căror expresie este :

— pentru rețeaua martor

$$T_m = \frac{p_0}{p - p_0}; \qquad (5.43a)$$

— pentru rețeaua deformată

$$T_d = \frac{p_{1.0}}{p_1 - p_{1.0}} \tag{5.43b}$$

unde p și p_1 sînt pasurile celor două rețete, iar p_0 și $p_{1.0}$ reprezintă lățimea benzilor opace ale rețelelor.

Transmitanța franjelor moiré este

$$T_m = \frac{f_i}{f - f_i} \tag{5.44}$$

unde f_i reprezintă partea spațiului dintre franje, care este ocupată de franja întunecată.

Considerînd triunghiurile formate din benzile succesive transparente și opace se stabilește relația [97]

$$\frac{f_i}{f} = \left[\frac{p_0}{p} + \frac{p_{1.0}}{p_1} - 1\right]. \tag{5.45}$$

Dacă $p = p_1$, relația (5.45) devine

$$\frac{f_i}{f} = \frac{2p_0 - p}{p}. \tag{5.46}$$

Din relația (5.46) rezultă că lățimea f_i a franjei devine zero dacă $p_0 = \frac{p}{2}$, adică atunci cînd transmitanța rețelelor este de 50 %. Cele mai bune rezultate pentru ascuțirea franjelor se obține dacă transmitanța este foarte aproape de 50 %, cunoscînd că lățimea aparentă a franjei, apreciată cu ochiul liber este mai mare decît aceea dată de relația (5.46).

d) *Mărimea suprafeței etalon și gradientul deformațiilor.* Precizia rezultatelor este influențată și de numărul informațiilor ce se pot obține asupra deformației modelului, adică de numărul total al franjelor moiré rezultate. Acesta depinde la același gradient al deformațiilor — de mărimea suprafeței modelului pe care se imprimă rețeaua (suprafața etalon). Dacă frecvența rețelei se mărește, în același raport poate fi redusă suprafața etalon, fără ca precizia să sufere. Astfel, dacă pe o suprafață etalon de 100×100 mm² se imprimă o rețea cu 20 linii/mm; în cazul unei rețele cu frecvența de 50 linii/mm, dacă suprafața etalon se reduce la 40×40 mm² — numărul franjelor, deci al informațiilor, rămîne același.

Influența unor defecte ale rețelelor. La interpretarea franjelor moiré pentru determinarea deformațiilor specifice și a tensiunilor, s-au făcut următoarele ipoteze:

— rețeaua deformată rămîne în planul său inițial și după deformație;

— planul rețelei martor și al rețelei deformate coincid sau sînt paralele la o distanță foarte mică;
— inițial nu există nici o deplasare unghiulară între rețele;
— ambele rețele, inițial, au distanțele dintre linii fără inegalități.

Practic, ipotezele de mai sus nu sînt totdeauna realizate ceea ce duce la erori, unele mici, care pot fi neglijate, altele care depășesc limitele admise și de care este necesar să se țină seama la interpretarea franjelor.

Studii legate de această problemă au fost făcute de Dantu [11], Ebbeni [29], [135] și Theocaris [97].

Concluziile la care au ajuns autorii menționați sînt prezentate în lucrarea [56,§6.2].

5.5. UTILIZAREA FRANJELOR MOIRÉ OBȚINUTE PRIN REFLEXIE

Ideea utilizării franjelor moiré, obținute prin reflexie, la măsurarea, în cazul plăcilor, a pantelor (curburilor), săgeților și a tensiunilor își are originea în lucrările lui Dantu [14], [15]. Același principiu este aplicat ulterior de Lichtenberg la studiul plăcilor subțiri [48].

Ulterior Theocaris [91], Ebbeni [28] și Andreeva [1], aduc o serie de perfecționări acestei metode.

Pentru aplicarea metodei se cunosc mai multe procedee.

5.5.1. PROCEDEUL CU AXA OPTICĂ PERPENDICULARĂ PE PLANUL REȚELEI

a) *Cazul plăcilor plane.* Franjele moiré obținute prin acest procedeu, dezvoltat de Lichtenberg [48], dau curbele de egală pantă parțială a suprafeței deformate. Principiul metodei este arătat în fig. 5.60. Un model M realizat cu o față reflectantă, simplu rezemat sau încastrat pe contur, este situat la o distanță d de un ecran opac E pe care s-a trasat o rețea de linii paralele, care se consideră, la început, paralele cu axa Ox, perpendiculară pe planul figurii. Pe direcția Oz, ecranul este prevăzut cu un orificiu în dreptul căruia este plasat un aparat fotografic F'.

Un punct P de pe ecran se reflectă în punctul C al modelului nedeformat și dă imaginea sa în aparatul fotografic F'. Punctul P se consideră că este situat pe o linie neagră a rețelei trasată pe ecran. După încărcarea plăcii (modelului) cu forța F, punctul C se deplasează în C' care va corespunde unui alt punct P' de pe ecranul E, a cărei imagine se va reflecta în același punct pe placa fotografică (distanța CC' fiind foarte mică, practic se poate considera că punctul C' rămîne pe linia CD).

Pentru ca punctele P și P' să fie situate pe același fel de linie (albă sau neagră) trebuie să fie satisfăcută relația

$$PP' = np \tag{5.47}$$

În lucrarea [48] se demonstrează că

$$\varphi = \frac{np}{2d\left[1 + \frac{a^2}{d^2}\right]}. \tag{5.48}$$

Deci unghiul φ are valoare constantă pentru toate punctele situate pe aceeaşi franjă.

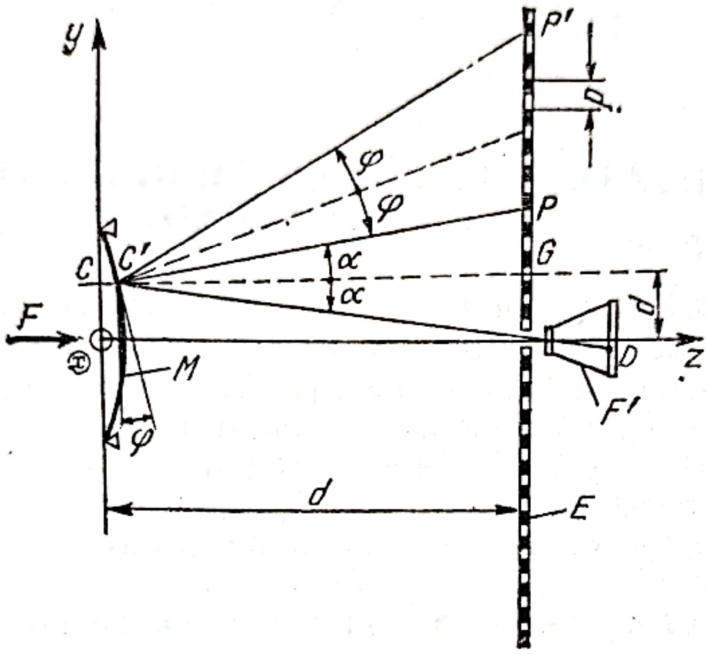


Fig. 5.60.

În cazul cînd liniile reţelei E sînt paralele cu axa Ox relaţia (5.48) dă valoarea unghiului de înclinare faţă de axa Oy adică :

$$\varphi_y = \frac{d\omega}{dy} = \frac{n_1 p}{2d\left[1 + \frac{a^2}{d^2}\right]} \tag{5.49a}$$

iar dacă liniile reţelei sînt paralele cu axa Oy aceeaşi relaţie dă valoarea unghiului de înclinare faţă de axa Ox, adică

$$\varphi_x = = \frac{d\omega}{dx} = \frac{n_2 p}{2d\left[1 + \frac{a^2}{d^2}\right]}. \tag{5.49b}$$

De regulă, ecranul E are forma cilindrică cu raza R. În acest caz, între lungimea arcului PP', raza ecranului şi unghiul de înclinare φ_y, corespunzător punctului C (fig. 5.61) există următoarea relaţie [56]:

$$\frac{(PP')_y}{2d} = \varphi_y (1 + K) \tag{5.50}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde : $K = k_2 - 1 - \frac{k_2 - 1 + k_1^2}{\sqrt{1 + k_1^2}} \cdot \left(k_1 = \frac{a}{d} \text{ și } k_2 = \frac{R}{d}\right)$.

Dacă raportul $\frac{a}{d}$, în comparație cu 1, se neglijează, rezultă $K = 0$

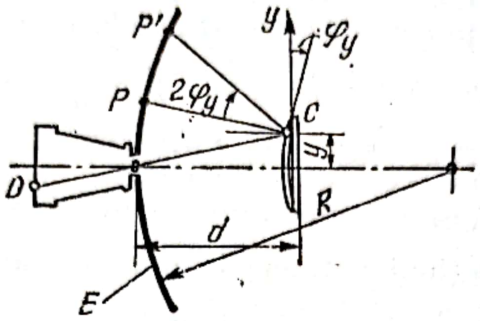


Fig. 5.61.

și relația (5.50) devine :

$$\frac{(PP')_y}{2d} = \varphi_y. \tag{5.51a}$$

O relație analogă se obține și pentru unghiul φ_x de înclinare parțială a punctului C față de axa Ox. În acest caz, fig. 5.61 trebuie considerată drept secțiunea orizontală a instalației cu ecranul E rotit cu 90°. Deci pentru, direcția Ox rezultă :

$$\varphi_x = \frac{(PP')_x}{2d} \tag{5.51b}$$

unde $(PP')_x$ și $(PP')_y$, așa cum s-a arătat, sînt proiecțiile arcului PP' pe secțiunea transversală a ecranului, corespunzătoare celor două poziții ale ecranului E, rotite la 90°.

Relațiile (5.51) pot fi exprimate și sub forma [1], [56]

$$\varphi_x = \frac{n_1 p}{2d} \text{ și } \varphi_y = \frac{n_2 p}{2d} \tag{5.52}$$

unde valorile lui n_1 și n_2 variază, în trepte unitare, de la o franjă la alta. Raportul $\frac{p}{2d}$ este o constantă a instalației care exprimă diferențele de înclinare parțială a pantei suprafeței modelului de format între două franje consecutive [77].

Deci, relațiile (5.52) pot fi exprimate sub forma

$$\varphi_x = n_1 \varphi_1 \text{ și } \varphi_y = n_2 \varphi_2 \tag{5.53}$$

n_1 și n_2 fiind numerele de ordine ale franjelor.

Prin aşezarea succesivă a ecranului E cu liniile paralele la cele două axe, se obţin două familii de franje moiré ce reprezintă curbele de nivel ale pantelor parţiale. Deci franjele moiré sînt linii de egală valoare a înclinărilor suprafeţei deformate $w = F(x, y)$.

Pentru a se putea determina — cu ajutorul celor două familii de franje — valorile momentelor încovoietoare M_x, M_y şi a momentului de torsiune M_{xy}, într-un punct oarecare al plăcii, de coordonate x şi y, este necesar să se determine valorile $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ şi $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$ — corespunzătoare punctului respectiv. Acestea pot fi obţinute prin derivarea pe cale grafică a diagramelor φ_x şi φ_y după direcţiile Ox şi Oy ce trec prin punctul considerat.

Diagramele de variaţie ale lui φ_y, de exemplu, se pot obţine tăind familia de franje $\frac{\partial w}{\partial x}$ cu secţiuni paralele la axa Ox adică se consideră $y = y_1, y_2 \ldots$ (fig. 5.62). Valoarea unghiului φ_1 este dată de relaţia (5.53) pentru $n_1 = 1$.

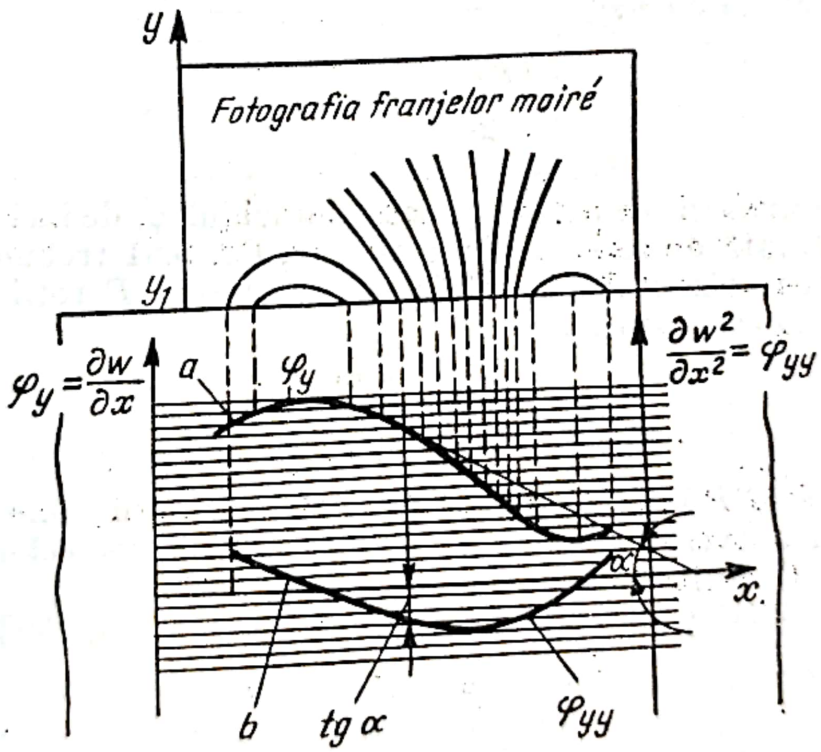


Fig. 5.62.

Din diagrama φ_y (curba a, fig. 5.62) se poate deduce, prin derivare grafică, variaţia lui $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, care reprezintă curbura parţială a plăcii în raport cu axa Ox. Această operaţie se efectuează ducînd în diferite puncte ale curbei φ_y tangentele geometrice (tg α) măsurate în sensul axei absciselor. Valorile tangentelor, astfel determinate, sînt ordonate în diagrama de variaţie a curbei $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \varphi_{yy}$ (curba b, fig. 5.62).

Scanned with OKEN Scanner

În mod similar se obțin diagramele de variație ale lui φ_x, tăind familia de franje moiré — obținute cu liniile ecranului paralele la axa Oy — — cu secțiuni paralele la axa Ox. Prin derivarea grafică a acestor diagrame se obțin diagramele de variație a lui $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \varphi_{xx}$ așa cum s-a arătat în fig. 5.62, curba b.

Pentru a obține valorile expresiilor $\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = \varphi_{xy}$, se taie familiile franjelor moiré $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial x} = \text{const.}$ cu secțiuni paralele la axa Oy, adică pentru $x = x_1, x_2 \ldots$ și se trasează diagrama de variație a lui φ_x în lungul axei Oy. Prin derivarea grafică a acestor diagrame se obțin valorile $\frac{\partial \varphi_x}{\partial x} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = \varphi_{xy}$.

Valoarea momentelor ce solicită placa se calculează cu ajutorul următoarelor relații, cunoscute din teoria elasticității:

$$M_{xx} = -D\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial^2 y}\right] = -D(\varphi_{xx} + \mu\varphi_{yy})$$

$$M_{yy} = -D\left[\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right] = -D(\varphi_{yy} + \mu\varphi_{xx}) \qquad (5.54)$$

$$M_{xy} = -D(1-\mu)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = -D[(1-\mu)\varphi_{xy}]$$

unde D este rigiditatea la încovoiere a plăcii, dată de relația

$$D = \frac{Ee^3}{12(1-\mu^2)} \qquad (5.55)$$

iar e este grosimea plăcii, E modulul de elasticitate și μ coeficientul lui Poisson corespunzător materialului din care este confecționat modelul.

Valorile tensiunilor din fibrele extreme ale plăcilor sînt date de relațiile:

$$\sigma_x = \frac{6M_{xx}}{e^2} = \frac{Ee}{2(1-\mu^2)}(\varphi_{xx} + \mu\varphi_{yy})$$

$$\sigma_y = \frac{6M_{yy}}{e^2} = \frac{Ee}{2(1-\mu^2)}(\varphi_{yy} + \mu\varphi_{xx}) \qquad (5.56)$$

$$\tau_{xy} = Ge\ \varphi_{xy}.$$

Direcția tensiunilor principale față de axa Ox se determină, tot cu ajutorul franjelor moiré, utilizînd relația

$$\operatorname{tg} 2\alpha_1 = \frac{2\varphi_{xy}}{\varphi_{yy} - \varphi_{xx}} = \frac{2}{\operatorname{cotg}\beta - \operatorname{tg}\alpha}. \qquad (5.57)$$

Scanned with OKEN Scanner

Orientarea tensiunilor principale depinde deci, de valorile unghiurilor α şi β, formate cu axa Ox, de tangentele la franjele moiré $\varphi_x = \text{const.}$ şi $\varphi_y = \text{const}$, concurente în punctul considerat P (fig. 5.63).

Derivata funcţiei φ_x de-a lungul franjelor $\varphi_x = \text{const.}$ cît şi derivata funcţiei φ_y de-a lungul franjelor $\varphi_y = \text{const.}$ sînt egale cu zero, adică $\frac{\partial \varphi_y}{\partial t_\alpha} = 0$ şi $\frac{\partial \varphi_y}{\partial t_\beta} = 0$, de unde rezultă ecuaţiile [1]

$$\varphi_{xx} \cos\alpha + \varphi_{xy} \sin\alpha = 0 \qquad (5.58)$$

$$\varphi_{yx} \cos + \varphi_{yy} \sin \beta = 0.$$

Cu ajutorul acestor ecuaţii se pot stabili o serie de criterii cu ajutorul cărora se poate analiza deformaţia suferită de model sub acţiunea sarcinii exterioare.

Prin eliminarea derivatei φ_{xy} din ecuaţiile (5.58) se obţine legătura dintre derivatele φ_{xx} şi φ_{yy}

$$\varphi_{xx} = \varphi_{yy} \operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\beta. \qquad (5.59)$$

Se observă că semnele lui φ_{xx} şi φ_{yy} sînt aceleaşi dacă $\operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\beta > 0$ adică dacă tangentele t_α şi t_β sînt în acelaşi cadran (fig. 5.63,a). Derivatele

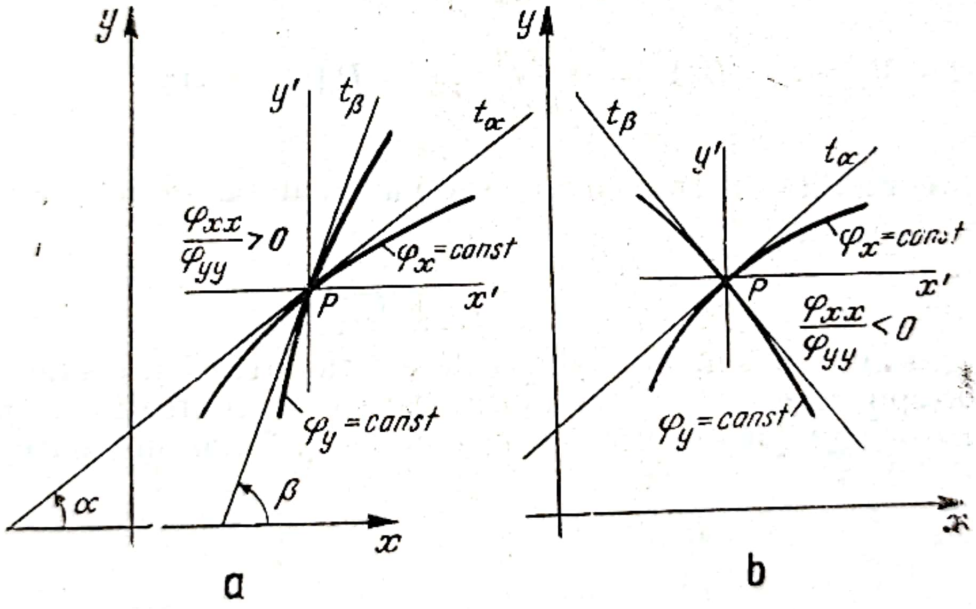


Fig. 5.63.

de ordinul doi, φ_{xx} şi φ_{yy} sînt de semn contrar dacă $\operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\beta < 0$ (fig. 5.63, *b*).

Tot din ecuaţiile (5.58) rezultă că liniile $\varphi_{xx} = 0$ trec prin punctele pentru care $\alpha = 0$ (tangenta t_α este paralelă cu axa Ox); liniile $\varphi_{xx} = 0$, trec prin punctele pentru care $\beta = 90°$ (t_β este paralelă la Oy) şi liniile $\varphi_{xy} = 0$ trec prin punctele pentru care $\alpha = 90°$ sau $\beta = 0°$ (t_α este paralelă la axa Oy sau t_β este paralelă la axa Ox), aşa cum se arată în fig. 5.64.

Cu ajutorul regulilor de mai sus, curbele φ_{xx}, φ_{yy} şi φ_{xy} pot fi uşor construite pe fotografia franjelor moiré. Aceste curbe împart supra faţa

Scanned with OKEN Scanner

plăcii pe zone în care derivatele respective de ordinul doi au același semn, deci ajută la determinarea semnului acestora în diferite zone ale plăcii.

În cazul plăcilor cu grosime mică, curbura este dată de relația [56]

$$K = \varphi_{xx}\varphi_{yy} - \varphi_{xy}^2.$$

Dacă se ține seamă de relația (5.59), rezultă

$$K = \varphi_{xy}^2(\operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\beta - 1). \tag{5.60}$$

Dacă în punctul considerat de pe suprafața modelului $K = 0$, există numai o singură orientare a curburii. Un astfel de punct se numește *parabolic*. Există suprafețe care au toate punctele parabolice. Ca exemplu poate fi dată suprafața unei plăci curbate cilindric. În acest caz

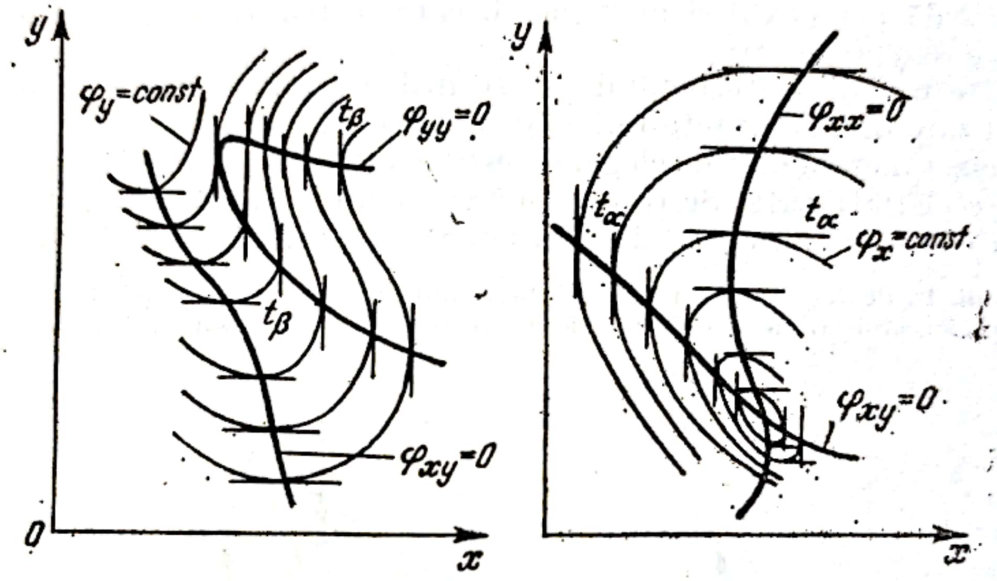


Fig. 6.64.

$$\operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\beta = 1. \tag{5.61}$$

Pentru a putea aprecia modul de deformare a plăcii, după ce s-au construit liniile de zero ale curburilor ($K = 0$) este suficient să se determine semnul lui K într-un punct arbitrar situat într-una din regiunile în care s-a împărțit suprafața modelului prin liniile $K = 0$.

În general, metoda prezentată, este foarte sensibilă. Astfel, de exemplu din experiențele efectuate de *Theocaris* a rezultat că în cazul unei plăci subțiri de sticlă de formă pătrată, cu latura de 75 mm, se produce o familie de franje foarte dese cînd se aplică pe sticlă o sarcină centrală de ordinul a cîteva grame [97].

Un avantaj important al acestei metode constă în faptul că unghiurile φ_x și φ_y, date de cele două familii de franje moiré, reprezintă diferența dintre valorile pantei, înainte și după încărcarea modelului, deci se obține numai curbura produsă de sarcinile exterioare, eliminîndu-se eventuala curbură inițială a modelului. Ca urmare, nu este necesar ca modelul să fie plan din punct de vedere optic înainte de a fi supus cercetării.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru înregistrarea franjelor, *Lightenberg* [48] a utilizat un aparat fotografic Zeiss Ikon Maximer cu plăci de 9 × 12 cm² și cu ecran de forma unui cilindru cu raza $R = 3{,}5d$, care poate fi rotit în jurul axei sale, pentru a se putea orienta liniile trasate paralel cu axa cilindrului, după direcția dorită. Pasul rețelei : $p = 2{,}2$ mm.

Încărcarea modelului se face cu un sistem de pîrghii ce necesită greutăți foarte mici, de ordinul a cîțiva daN.

Atît modelul cît și ecranul sînt iluminate uniform cu ajutorul unui reflector obișnuit.

Pentru confecționarea modelelor poate fi utilizat orice material care poate fi reflectant pe una din cele două fețe. Dintre materialele plastice se recomandă perspexul și plexiglasul, care se realizează reflectante prin aluminare sau argintare.

Dintre metale se recomandă să se utilizeze aluminiul și alama, care după polizare dau suprafețe reflectante de bună calitate.

Precizia metodei, se înțelege, că este invers proporțională cu mărimea pasului rețelei utilizate. Se recomandă așa cum s-a arătat mai sus utilizarea unui ecran de formă cilindrică, cu raza cuprinsă între $3d$ și $4d$ [56].

Aplicații. 1°. Pentru ilustrarea metodei, prezentată mai sus, se dau rezultatele cercetării unei plăci cu formă de triunghi dreptunghic încărcată cu o sarcină concentrată [2]. Grosimea

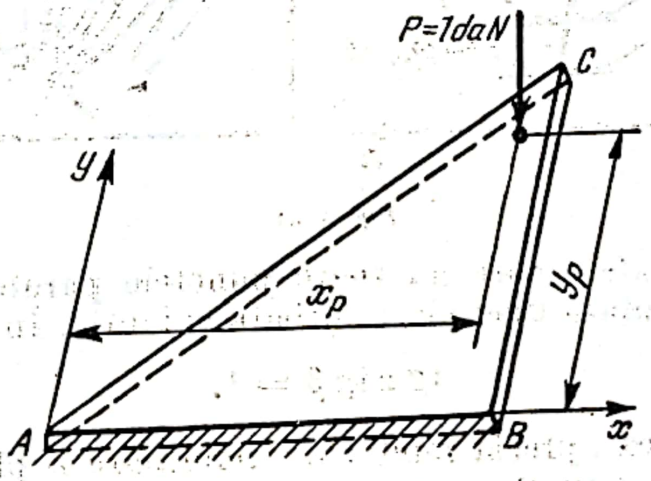


Fig. 5.65.

plăcii este de 1,6 mm, iar coordonatele punctului de aplicație a sarcinii P sînt $x_p = 202$ mm și $y_p = 238$ mm. Placa este încastrată după axa Ox, adică pe latura AB (fig. 5.65).

În figura 5.66, a este prezentată fotografia franjelor obținute cu poziția paralelă la axa Oy a liniilor rețelei (franjele reprezintă φ_x=const.), iar în fig. 5.66, b este prezentată fotografia franjelor obținute cu poziția liniilor rețelei paralelă la axa Ox (franjele reprezintă φ_y = const).

În ambele cazuri valoarea cîmpurilor este aceeași : $\varphi_1 = \dfrac{p}{2d} = 0{,}00245$ rad. (sau 0°8′27″).

În fig. 5.66, c sînt reprezentate, suprapuse pe aceeași figură, curbele φ_y = const și φ_x = const, Se observă că pe direcția Ox, adică în secțiunea de încastrare, φ_x = const. = 0. În fig. 5.66, b aceasta corespunde unei dungi întunecate. Plecînd de la această franjă se pot determina atît numerele de ordine ale celorlalte franje, cît și valorile unghiurilor de rotire φ_x, corespunzătoare unui punct oarecare situat pe franja de ordinul n ($\varphi_x = n\varphi_1$).

De regulă, pentru construirea curbelor φ_x și φ_y ca și a curbelor $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$, $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ și $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$, necesare la calculul momentelor ce solicită placa se utilizează metoda grafică prezentată în fig. 5.62.

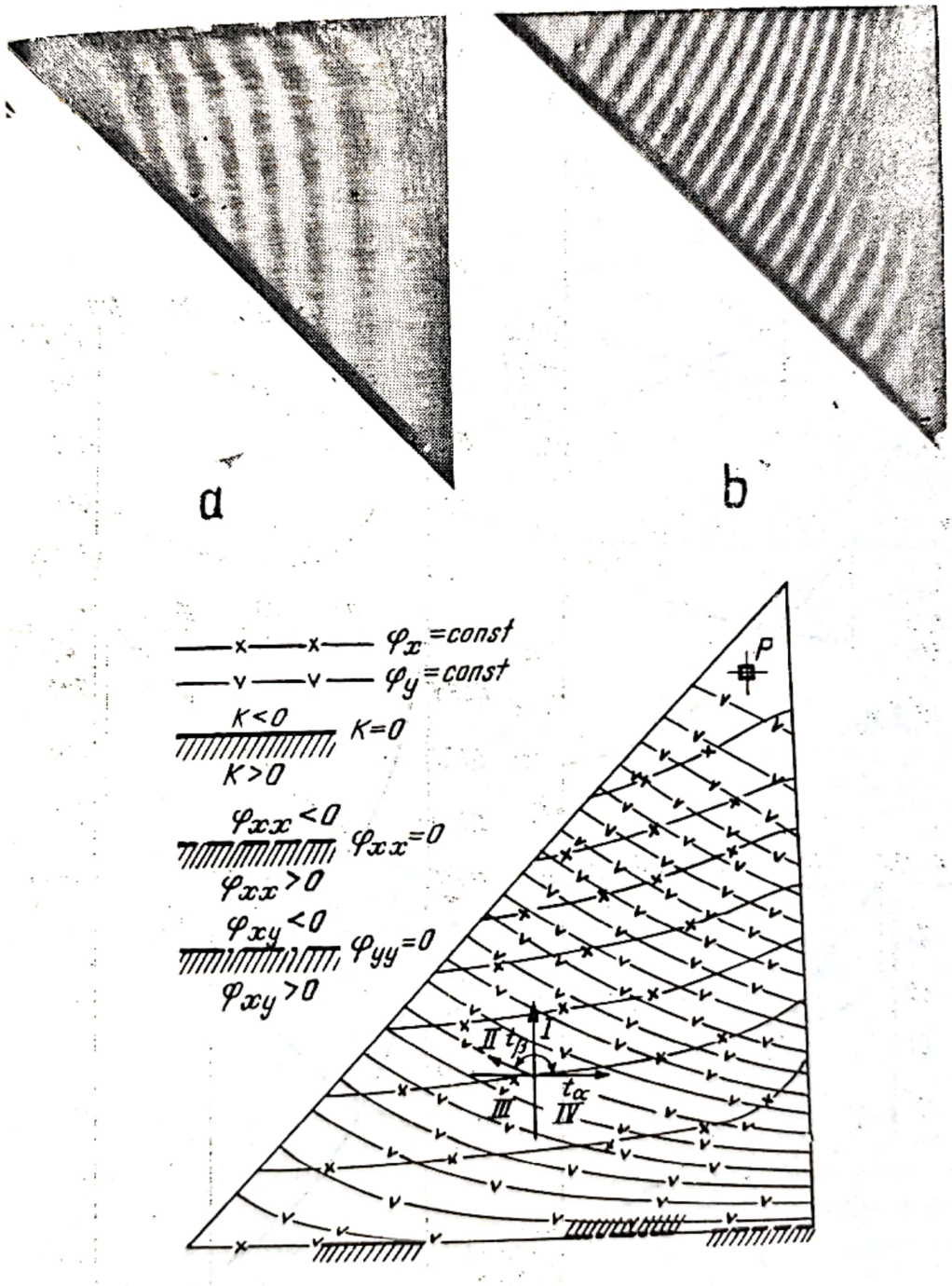


Fig. 5.66.

2. În figura 5.67, a sînt date axele franjelor moiré [109] φ_x = const. și φ_y = const., iar în figura 5.67, b se dă fotografia franjelor φ_x = const., obținute pentru o placă circulară perforată

Scanned with OKEN Scanner

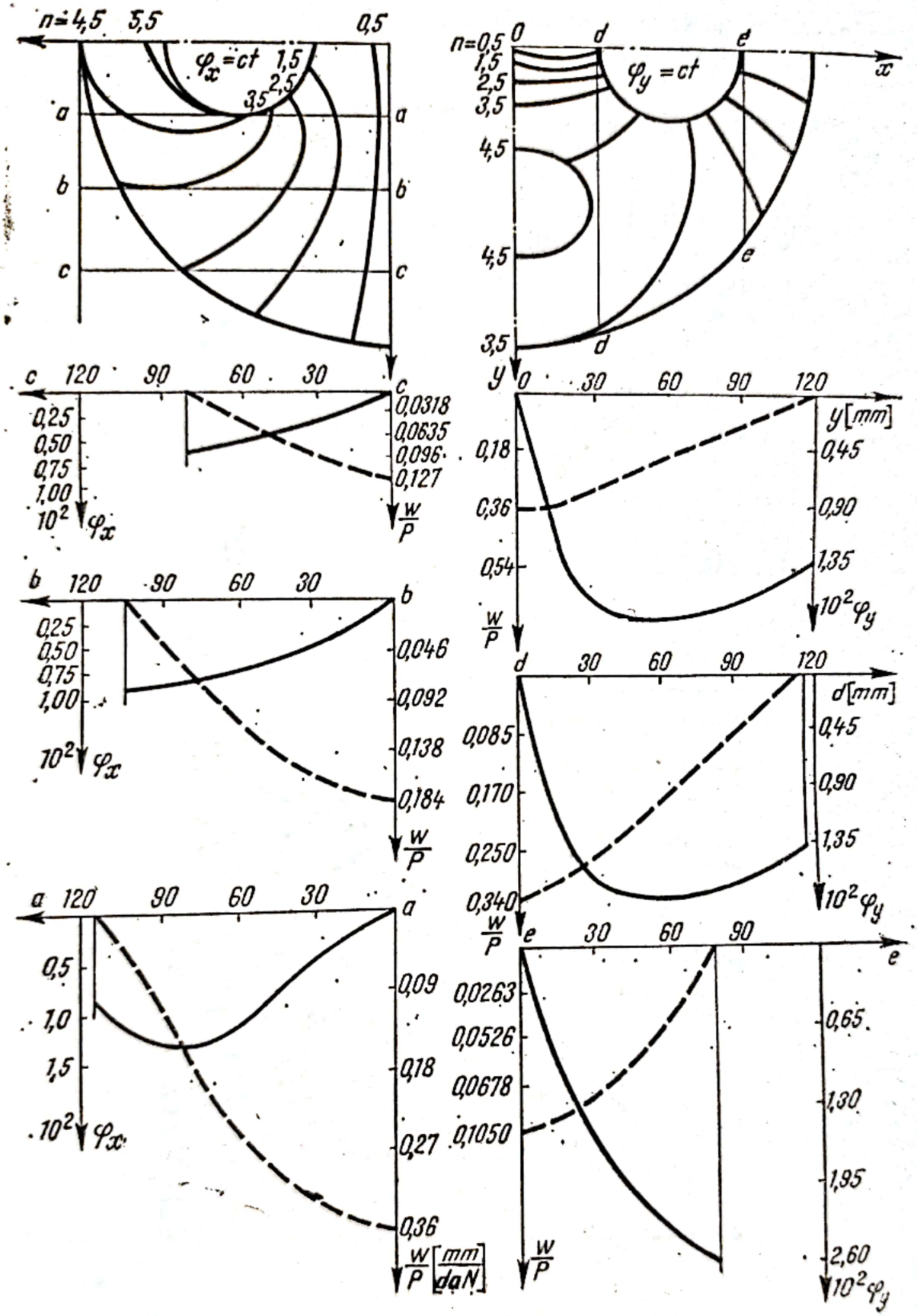
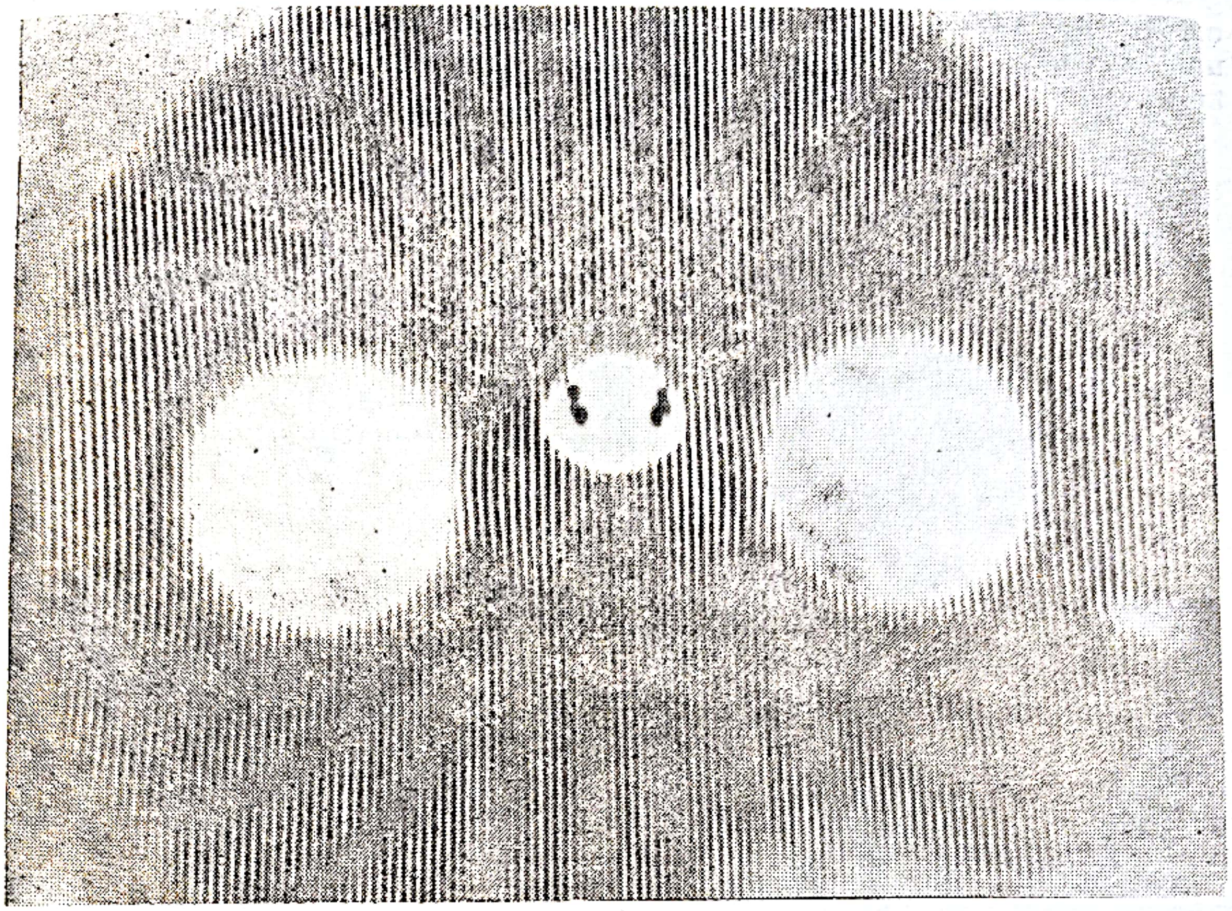


Fig. 5.67

Scanned with OKEN Scanner



b

Fig. 5.67.

prin două găuri de diametru 60 mm. dispuse simetric față de centrul plăcii și la o distanță, față de acesta, de 60 mm. Placa, confecționată din plexiglas, cu diametrul de 240 mm și grosimea de 4,4 mm, este simplu rezemată pe contur și a fost încărcată central cu o forță concentrată de $P = 5$ daN. Lucrarea a fost realizată în laboratorul catedrei de rezistența materialelor de la Institutul politehnic București.

Utilizînd franjele $\varphi_x = \text{const.}$ și efectuînd integrarea curbei $\varphi_x = f(x)$, s-a trasat, în fig. 5.67,a, distribuția săgeții w, raportată la sarcina P, în lungul direcțiilor $a-a$, $b-b$, $c-c$, direcții ce sînt paralele cu diametrul care trece prin cele două găuri. În mod similar, folosind franjele $\varphi_y = \text{ct.}$, s-a trasat distribuția pantei φ_y și a săgeții w, raportată la sarcina P, în lungul direcțiilor Oy, $d-d$ și $e-e$. Cu rezultatele obținute, în figura 5.67, c se reprezintă variația săgeții w, raportată la sarcina P, în lungul diametrului Ox pentru placa perforată și pentru o placă neperforată. Se observă că săgeata plăcii perforate este, în zona centrală, de cca. 1,5 ori mai mare decît săgeata unei plăci neperforate. În figura 5.67, d se arată fotografia instalației utilizată de autor a cărei descriere este prezentată, detailat, în lucrarea [77].

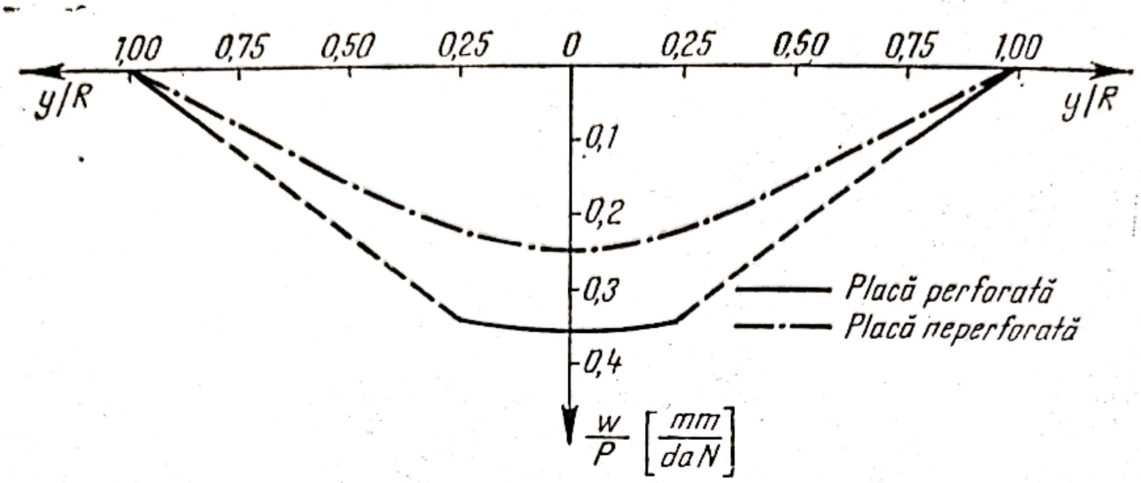
b) *Cazul plăcilor curbe.* Primul cercetător care a studiat deformația plăcilor curbe cu ajutorul franjelor moiré a fost *De Joselin de Jong* [56]. Ulterior metoda a fost dezvoltată și pusă la punct de către Theocaris [92], [93], [97], care utilizează, în acest scop, două procedee analoage cu cele utilizate la studiul deformațiilor plăcilor plane și anume :

— metoda prin reflexie cu două ecrane-rețele depărtate de model ;

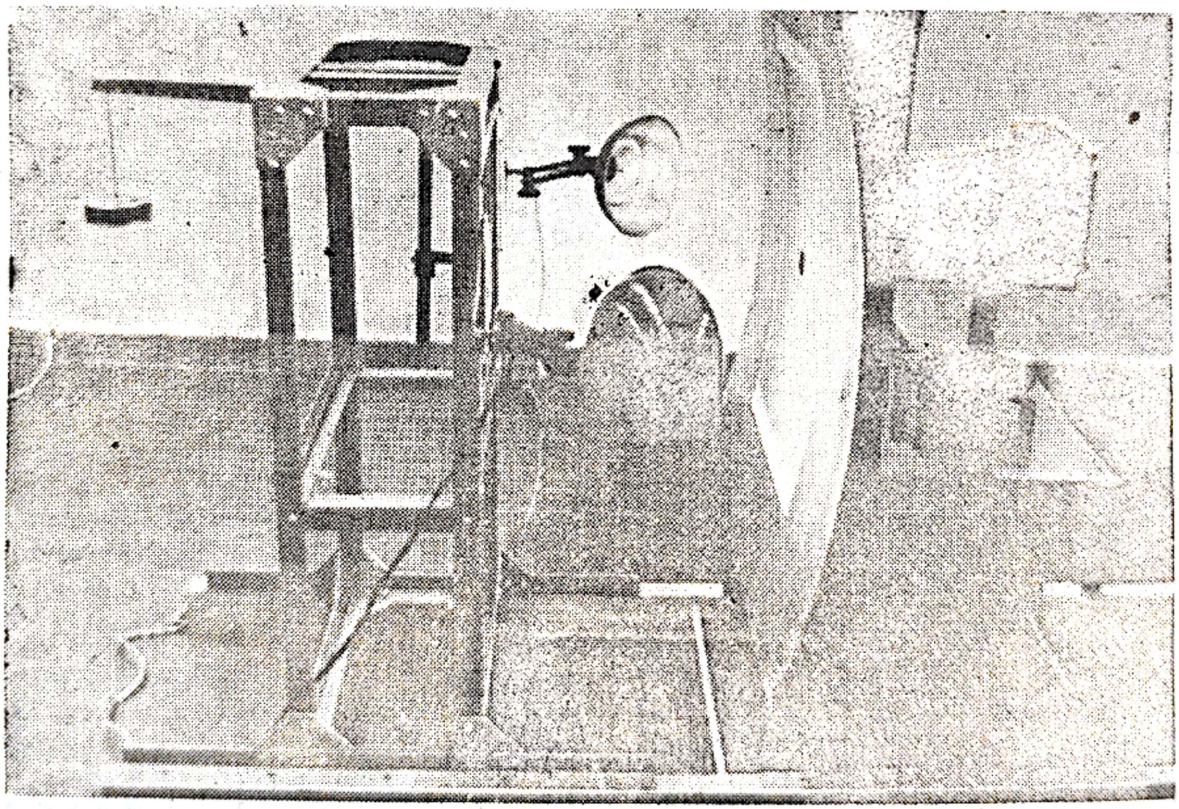
— procedeul cu incidență oblică cu ecranul foarte apropiat de suprafața modelului.

Pentru a defini starea de deformare a suprafeței modelului este necesar să se cunoască, în fiecare punct, panta parțială după două direcții

ortogonale, respectiv curbura după cele două direcţii. Planul tangent la un punct oarecare al suprafeţei modelului se notează cu xOy, iar normala la suprafaţă în punctul respectiv cu Oz (fig. 5.68).



c



d

Fig. 5.67

Deplasarea după direcţia Oz se notează cu w, iar panta suprafeţei de-a lungul unei direcţii oarecare m (OP), care face unghiul ω cu direcţia Ox, este dată de relaţia :

$$\frac{\partial w}{\partial m} = \frac{\partial w}{\partial x} = \cos \omega + \frac{\partial w}{\partial y} \sin \omega. \qquad (5.62)$$

Scanned with OKEN Scanner

Dacă punctul P de pe suprafaţa modelului este suficient de apropiat de originea O, se poate considera $OP = OP'$. În acest caz derivatele $\frac{\partial w}{\partial x}$; $\frac{\partial w}{\partial y}$ şi $\frac{\partial w}{\partial m}$, exprimă valorile unghiurilor θ formate între axele pla-

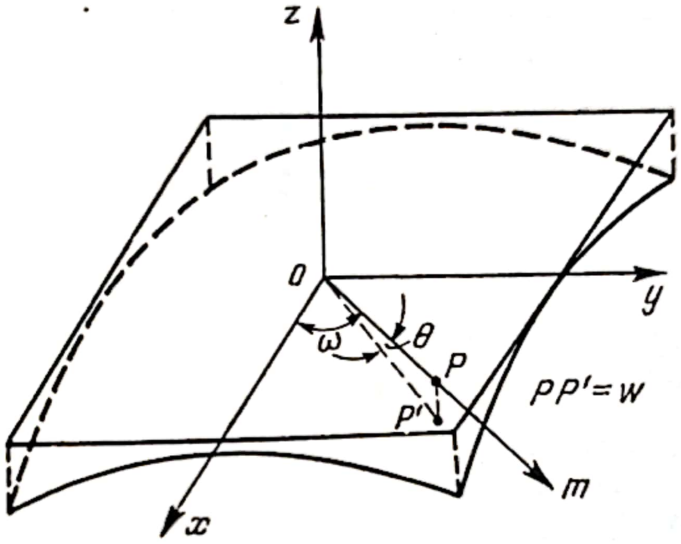


Fig. 5.68.

nului de referinţă Ox, Oy şi Om, iar curburile suprafeţei, corespunzătoare punctului O, sînt:

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} = \frac{\partial^2 w}{\partial m^2}; \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \text{ şi } \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \tag{5.63}$$

Cu cît modelul are curbură mai mare cu atît lăţimea OP a suprafeţei ce se studiază trebuie să fie mai mică.

Au fost studiate prin această metodă, în special suprafaţa cilindrică şi conică, care au fost împărţite în benzi înguste, lăţimea acestora fiind invers proporţională cu raza de curbură a suprafeţei. Fiecare fîşie este adusă succesiv în poziţia în care a fost studiată fîşia precedentă. În acest scop, se utilizează dispozitive de rotire a modelului sincronizate cu mişcarea filmului în aparatul fotografic.

În cazul procedeului cu incidenţă normală, obţinerea franjelor moiré se face analog ca în cazul prezentat la § 5.3.1. pentru modele plane.

În fig. 5.69 se prezintă montajul optic utilizat în cazul cercetării deformaţiilor suferite de suprafaţa unui model cilindric. O reţea martor RM este aşezată între sursa de lumină I, formată dintr-o lampă de sodiu, şi model. Liniile reţelei sînt orientate, mai întîi, paralel cu generatoarele suprafeţei modelului (fig. 5.69, a) şi apoi perpendicular faţă de acestea (fig. 5.69, b) pentru a obţine cîte două familii de franje ce exprimă pantele parţiale φ_x şi φ_y.

Pasul rețelei RM și distanța l_1 a rețelei de la generatoarea cea mai apropiată a cilindrului au fost astfel alese încît să reproducă imaginea RM' a rețelei RM la o distanță l_1', în spatele suprafeței, cu o frecvență adecvată. Un aparat fotografic F_1 plasat la o distanță l_2 față de punctul cel mai apro-

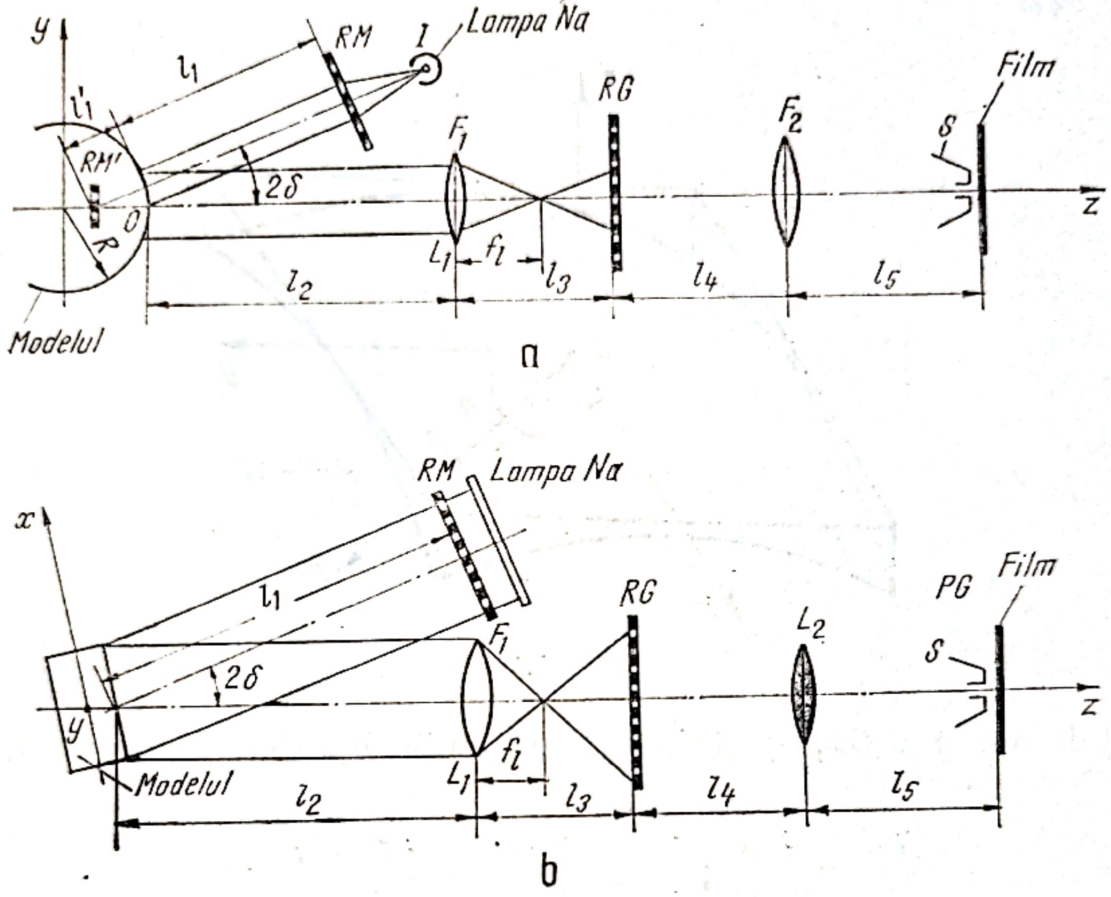


Fig. 5.69.

piat al modelului și la un unghi 2δ față de raza de lumină incidentă, înregistrează, pe geamul său mat, imaginea rețelei (RM).

Pe geamul mat al aparatului fotografic F_1 se suprapune o a doua rețea RG care are liniile paralele cu cele ale rețelei RM. Distanțele $l_1 + l_1'$ (dintre lentila L_1 și imaginea RM') și l_3 (dintre lentila L_1 și rețeaua RG) au fost reglate astfel încît imaginea RM' a primei rețele să aibă aceeași frecvență cu aceea a rețelei RG. Dacă se schimbă distanța l_1, se schimbă și frecvența imaginii RM' și interferența acesteia cu rețeaua RG va prezenta franje inițiale.

Un al doilea aparat fotografic este așezat în spatele rețelei RG, la o distanță l_4 de rețeaua RG, care înregistrează franjele moiré rezultate din suprapunerea celor două rețele.

Între raza de curbură R a modelului și celelalte elemente geometrice ale dispozitivului optic (fig. 5.69, a) există următoarea relație, stabilită plecînd de la relații cunoscute din optica geometrică [97]:

$$R = \frac{2l_1(l_2 - f_1)}{\lambda f_1 - (l_1 + l_2) + f_1} \tag{5.64}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde λ este raportul dintre pasurile reţelelor RM şi RG. Dacă curbura este constantă franjele moiré vor fi echidistante. Orice variaţie a razei de curbură va produce distanţări inegale între franje.

Ideea de a aduce succesiv benzi înguste ale suprafeţei curbate într-o poziţie de referinţă, prin desfăşurarea suprafeţei cercetată într-o suprafaţă plană, a fost realizată de Theocaris [97] prin utilizarea unui aparat fotografic periferic care poate fotografia suprafeţe exterioare sau interioare ale corpurilor cilindrice sau conice cît şi vase cu pereţii subţiri sensibil diferite de cele cilindrice circulare.

Aşa cum s-a arătat mai sus, aparatul foto este construit sub forma a două unităţi separate : o masă roativă pe care este fixat modelul, şi care aduce succesiv benzile înguste ale suprafeţei cercetate perpendicular pe axul aparatului fotografic şi un aparat foto, propriu-zis, F_2 ce conţine un mecanism de deplasare a filmului care se găseşte în spatele unei fante staţionare S.

Comanda turaţiei mesei rotative şi a translaţiei filmului se realizează cu ajutorul unor electromotoare sincrone. Filmul fiind plasat în imediata apropiere a fantei S, pe acesta se va inregistra numai o bandă centrală îngustă a suprafeţei modelului.

În cazul modelelor conice, masa rotativă a aparatului se înclină cu un unghi egal cu jumătatea unghiului conului, astfel ca generatoarea conului, în timpul rotirii, să rămînă paralelă cu planul reţelei RG. Forma suprafeţei laterale apare totuşi deformată deoarece punctele generatoarelor se deplasează cu viteze diferite. Cunoscînd că variaţia vitezei este liniară, se poate face, uşor, corecţia corespunzătoare a franjelor moiré obţinute.

5.5.2. PROCEDEUL CU AXA OPTICĂ OBLICĂ FAŢĂ DE PLANUL REŢELEI

a) *Cazul plăcilor plane.* La acest procedeu franjele moiré sînt obţinute din suprapunerea imaginei unei reţele plane transparente peste cea a reţelei reflectate, pe placa deformată, privită în incidenţă oblică. Procedeul a fost dezvoltat de Ebbeni [27], [28] şi Theocaris [91], [97] şi este utilizat pentru obţinerea isoteticelor.

Principiul procedeului este arătat în fig. 5.70. O reţea R de pas p, cu liniile orizontale, este aşezată în faţa modelului M, care este realizat cu suprafaţa reflectantă.

Imaginea franjelor, formate prin suprapunerea liniilor reţelei R, cu liniile reflectate de model, este înregistrată de un aparat fotografic plasat cu obiectivul în punctul O_1.

Modelul, iniţial, este cuprins în planul xOy, iar după ce acesta a fost încărcat se deformează şi suprafaţa reflectantă, iniţial plană, devine suprafaţă curbă.

Pentru stabilirea relaţiilor de calcul se consideră următoarele două cazuri :

Cazul a. În punctul O_1 (fig. 5.70) se vede atît imaginea punctului A, reflectată pe placă în punctul B, cît şi imaginea punctului C de pe ecran

Scanned with OKEN Scanner

Dacă cele două puncte se găsesc pe cîte o linie neagră, imaginea obținută în punctul O_1 corespunde unui punct de interferare a rețelelor, deci se găsește pe o franjă, adică este îndeplinită condiția $AC = np$.

În lucrarea [28] se demonstrează că :

$$AC = 2w_1 \frac{y_1}{d + w_1}. \tag{5.65}$$

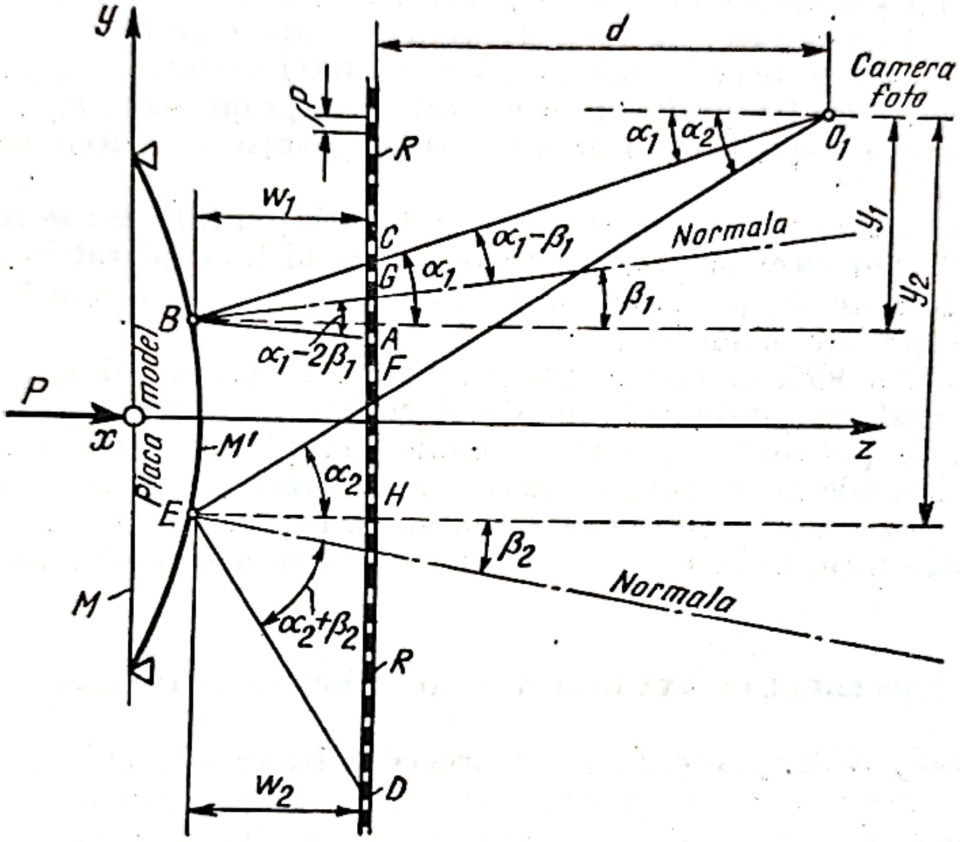


Fig. 5.70.

Dacă ecranul R se plasează foarte aproape de model și punctul de observație este la distanță suficient de mare, se poate neglija valoarea lui w_1 de la numitorul relației de mai sus și aceasta devine :

$$AC = 2w_1 \frac{y_1}{d}. \tag{5.66}$$

Ținînd seama că $AC = np$, se obține

$$w_1 = \frac{npd}{2y_1} = \frac{np}{2 \operatorname{tg} \alpha_1}. \tag{5.67}$$

Cazul b. În punctul de observație O_1 se vede punctul D, reflectat pe modelul deformat M', în E, peste care se suprapune imaginea punctului F. Dacă este îndeplinită condiția $FD = np$, în O_1 se va vedea un punct situat pe o franjă.

Făcînd un calcul similar celui de la cazul a, se obține, în final relația [28]:

$$w_2 = \frac{ndp}{2y_2} = \frac{np}{2 \operatorname{tg} \alpha_2} \tag{5.68}$$

analogă cu relația (5.67) stabilită pentru cazul a.

Ebbeni în lucrările [27], [28] demonstrează că prin simplificările făcute pentru obținerea relațiilor (5.67) și (5.68) eroarea ce se face nu depășește 1%.

Din relațiile menționate se vede că franjele obținute cu incidență oblică, dacă rețeaua R este foarte apropiată de model, dau locurile de egală deplasare a punctelor modelului pe direcția Oz perpendiculară la planul rețelelor. Franjele se obțin prin realizarea unei singure fotografii care cuprinde simultan imaginea reflectantă a modelului deformat M'.

Metoda poate fi utilizată și pentru determinarea constantelor elastice E și μ [34], [35].

b) *Cazul plăcilor curbe.* Modelul ce face obiectul cercetării este realizat cu suprafața mată și este plasat în spatele rețelei martor RM (fig. 5.71).

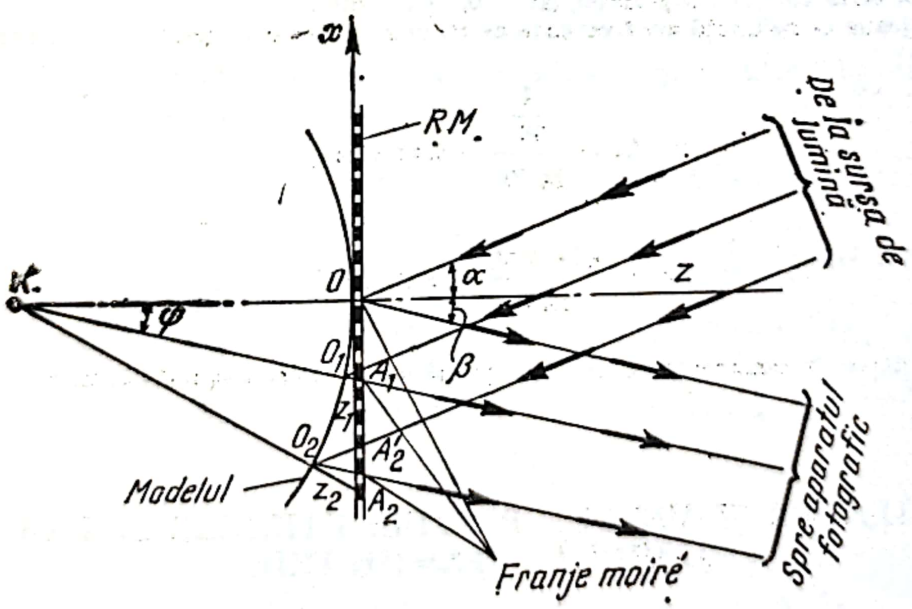


Fig. 5.71.

Un fascicul de lumină, produs de o lampă cu vapori de sodiu, luminează suprafața modelului sub un unghi α.

Principiul formării franjelor moiré este același ca și în cazul modelelor cu suprafața plană (vezi § 5.5.2a).

Scanned with OKEN Scanner

Diferența de distanță corespunzătoare a două franje moiré succesive este dată de relația

$$\Delta z = \frac{p}{\operatorname{tg} \alpha} \tag{5.69}$$

unde p este pasul rețelei RM.

Această diferență de distanță conține, pe lîngă un termen Δw, datorită deformației laterale a modelului, și un termen Δc, datorită curburii suprafeței acestuia, deci

$$\Delta z = \Delta w + \Delta c.$$

Reducînd lățimea suprafeței studiate la o bandă îngustă, termenul Δc poate fi neglijat. Ca urmare, deformația laterală a modelului poate fi calculată cu relația

$$\Delta w = \frac{p}{\operatorname{tg} \alpha}. \tag{5.70}$$

Deci franjele rezultate dau contururile de egală deplasare după direcția normală pe planul tangent la suprafața curbei.

Aplicație. Se consideră peretele unui vas cilindric cu diametrul $D = 84$ mm. Pentru o fantă a camerei foto de 0,2 mm — care produce franje bine contrastante cu un sistem simplu de iluminare — lățimea b a fișiilor cercetate este de 0,5 cm. La această lățime corespunde o deformație, datorită curburii suprafeței, $\Delta c = 0{,}7 \cdot 10^{-3}$ mm.

Dacă rețeaua de referință are frecvența de 50 linii pe mm și unghiul de incidență α este de 25°, rezultă :

$$\Delta z = \frac{\frac{1}{50}}{\operatorname{tg} 50} = 0{,}43 \text{ mm}$$

și

$$\Delta c = \frac{0{,}7 \cdot 10^{-3}}{0{,}43} = 1{,}63 \cdot 10^{-3}.$$

Deci neluarea în considerare a curburii plăcii dă o eroare neglijabilă, în acest caz, mai mică de 0,2 %.

5.6. NOI TEHNICI ȘI METODE PRIVIND UTILIZAREA FRANJELOR MOIRÉ ÎN TENSOMETRIE

S-a arătat (§ 5.4) că determinarea stării de deformație cu ajutorul franjelor moiré este cu atît mai precisă cu cît pasul rețelelor utilizate este mai mic. S-a arătat, de asemenea, că frecvența liniilor rețelelor utilizate în tensometrie este limitată datorită dificultăților menționate la § 5.3. Din această cauză pînă în ultimul timp, franjele moiré obținute prin interferență geometrică au fost utilizate numai la studiul modelelor și struc-

Scanned with OKEN Scanner

turilor realizate din materiale cu modul de elasticitate realativ mic (mase plastice, aliaje de aluminium ş.a.).

Utilizînd cunoştinţele noi din domeniul opticii fizice [111], în ultimii ani au fost dezvoltate o serie de noi metode şi tehnici, cu scopul de a spori sensibilitatea metodelor tensometrice bazate pe fenomenul moiré (interferometria mecanică).

Dacă se consideră două reţele cu pas diferenţiat (v § 5.2.7); $p_2 = p_1 (1 + \lambda)$, unde $\lambda \ll 1$, care sînt suprapuse într-un plan xOy şi luminate de un fascicul de unde luminoase plane în incidenţă normală, ca în fig. 5.72 stabilind expresia amplitudinii luminoase într-un punct Q situat

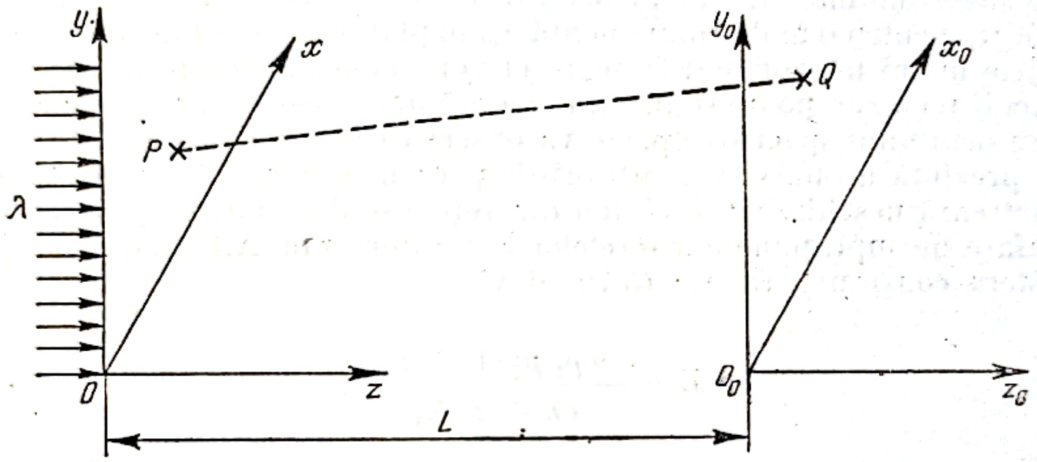


Fig. 5.72.

într-un plan de observaţie $x_0O_0y_0$ paralel cu xOy şi aflat la distanţa L, rezultă relaţia, stabilită în lucrarea [114]:

$$L = \nu \frac{p_1 p_2}{\lambda_0 \lambda}, \text{ unde } \nu = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots \tag{5.71}$$

care stabileşte poziţia planului în care contrastul franjelor moiré ce se formează este maxim.

Dacă reţeaua de pas p_2 suferă o deformaţie în planul său, ca urmare a deformării modelului pe care aceasta este aplicată, franjele moiré de contrast maxim vor apare într-un plan situat la distanţa

$$L = \nu \frac{p_1 p_2 (1 + \varepsilon)}{(\lambda + \varepsilon) \lambda_0}; \tag{5.72}$$

λ_0 din relaţiile de mai sus reprezintă lungimea de undă a fasciculului luminos, ε este deformaţia specifică în punctul P (x, y) după direcţia Oy, iar ν numărul armonicii luminoase.

Relaţia (5.72) se mai poate scrie:

$$\varepsilon = \frac{\dfrac{p_1 p_2}{\lambda_0 L} - \lambda}{1 - \nu \dfrac{p_1 p_2}{\lambda_0 L}}. \tag{5.73}$$

Pentru valori cunoscute ale lui p_1, p_2, λ și ν, distanțele de observație L sînt funcție de deformația specifică ε. Deci este posibil de a stabili valorile lui ε în funcție de valorile măsurate L.

Rezette [117] numește această metodă „*metoda variației distanței*". Ea oferă posibilitatea de a se determina direct deformațiile specifice fără a fi nevoie să se efectueze o derivare grafică cum se procedează în cazul metodei clasice (v. § 5.2.5). În același timp sensibilitatea metodei crește, putîndu-se măsura deformații specifice de ordinul a 5.10^{-4}.

Dacă sursa de lumină nu este punctuală și monocromatică ci prezintă un spectru continuu de frecvențe, diferitele unde componente, emise de către sursa luminoasă, sînt incoerente între ele. Dacă relația (5.72) este verificată pentru o undă componentă λ_0', în planul de observație considerat, franjele moiré nu vor mai fi negre ci vor lua tenta complementară a lui λ_0'. Acest fenomen poate fi pus în evidență dacă aceste franje se analizează cu ajutorul unui spectroscop. Se va observa că curba de intensitate spectrală prezintă un maxim de absorbție pentru lungimea de undă λ_0'. Dacă se păstrează neschimbat L și una din rețele se deformează și se limitează suprafața de suprapunere a rețelelor la un domeniu ΔA (unde ε se poate considera constant), relația (5.72) devine :

$$L = \frac{\nu p_1 p_2 (1 + \varepsilon)}{(\lambda + \varepsilon)\lambda_0'} \tag{5.74}$$

sau

$$\varepsilon = \frac{\dfrac{\nu p_1 p_2}{\lambda_0' L} - \lambda}{1 - \nu \dfrac{p_1 p_2}{\lambda_0' L}} \tag{5.75}$$

unde λ_0' este noua undă componentă absorbită iar ε este deformația specifică în lungul axei Oy. Valoarea lui ε este o valoare medie pe domeniul ΔA. Dacă ν, p_1, p_2, λ și L sînt cunoscute, este deci posibil să se calculeze ε măsurînd lungimea undei absorbite λ_0', care poate fi determinată experimental printr-un releveu spectroscopic al distribuției intensității spectrale a luminii emise de către un franj colorat. Această metodă, numită de către Ebbeni [114] metoda *spectroscopică* de determinare directă a deformațiilor este mai complexă din punct de vedere experimental și precizia sa depinde de localizarea precisă a lui λ_0'. Experiențele făcute[114] utilizînd un spectroscop cu rețea și un densitometru optic pentru analiza filmului obținut au condus la o ridicare și mai mare a sensibilității metodei. Metoda este punctuală datorită utilizării spectroscopului cu rețea și a densitometrului optic pentru determinarea distribuției de intensitate spectrală și nu permite urmărirea pe parcurs a măsurărilor.

Avînd în vedere inconvenientele metodei spectroscopice, în lucrarea [109] s-a determinat experimental lungimea de undă λ_{max} care corespunde

Scanned with OKEN Scanner

planului de contrast maxim al franjelor. Aceasta s-a realizat prin măsurarea contrastului franjelor. Instalația utilizată este compusă din (fig. 5.73):

— un monocromator M care permite varierea lungimii de undă a luminii emise între 2000Å și 10.000Å;

— un sistem de lentile L_1 pentru a se obține un fascicul de unde luminoase plane;

— o diafragmă D pentru limitarea elementului de suprafață ΔA;

— o masă deplasabilă T pe care sînt așezate rețelele R;

— un fotomultiplicator FM situat la distanța L față de rețelele R;

— un sistem de înregistrare $I(X-Y)$ și sursa de alimentare SA.

Păstrînd distanța L fixă și variind lungimea de undă a luminii emise de monocromator se face, cu ajutorul fotomultiplicatorului, înregistrarea

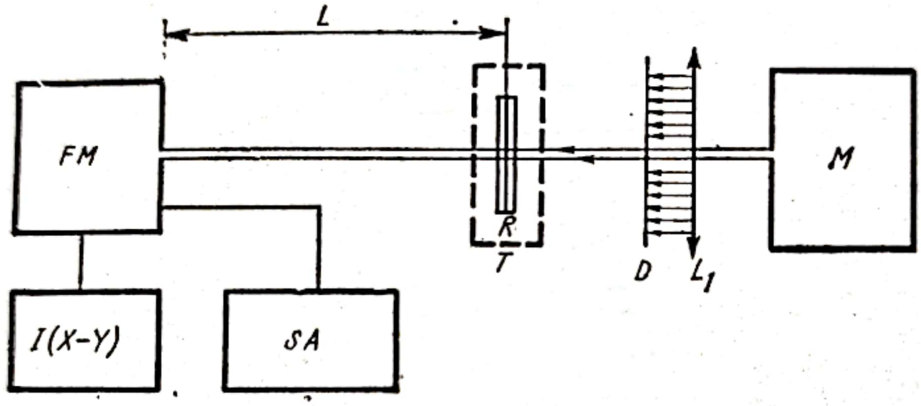


Fig. 5.73.

variației de intensitate luminoasă, în funcție de lungimea de undă, pentru o franjă întunecată și pentru două franje luminoase care mărginesc franja întunecată. Contrastul unui franj este:

$$c = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} \tag{5.76}$$

I_{max} fiind intensitatea medie a două franje luminoase care mărginesc o franjă întunecată de intensitate I_{min}. Trasînd variația $c = f(\lambda)$ se determină λ_{max} care corespunde planului de contrast maxim al franjelor iar cu relația (5.75) se determină direct deformația specifică ε în punctul considerat.

Sensibilitatea metodei este de ordinul a 5×10^{-5} în comparație cu 10^{-3} în metoda clasică și cu 5×10^{-4} în metoda *variației distanței*.

Aplicații. 1°. Utilizînd rețele cu pas diferențiat în figura 5.74 se prezintă franjele moiré obținute în urma supunerii la compresiune a unui element avînd grosimea constantă și forma din fig. 5.75. Una din rețele de pas $p_1 = 5{,}09 \times 10^{-2}$ mm a fost aplicată pe una din fețele elementului. Utilizînd instalația descrisă în figura 5.73 s-au obținut valorile lui ε_y în punctele studiate, ceea ce a permis trasarea, în fig. 5.76, a variației lui ε_y în lungul axului vertical al elementului. Rezultatele obținute prin această metodă sînt foarte apropiate de cele obținute — de același autor — utilizînd fotoelasticitatea și tensometria electrică rezistivă [109].

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

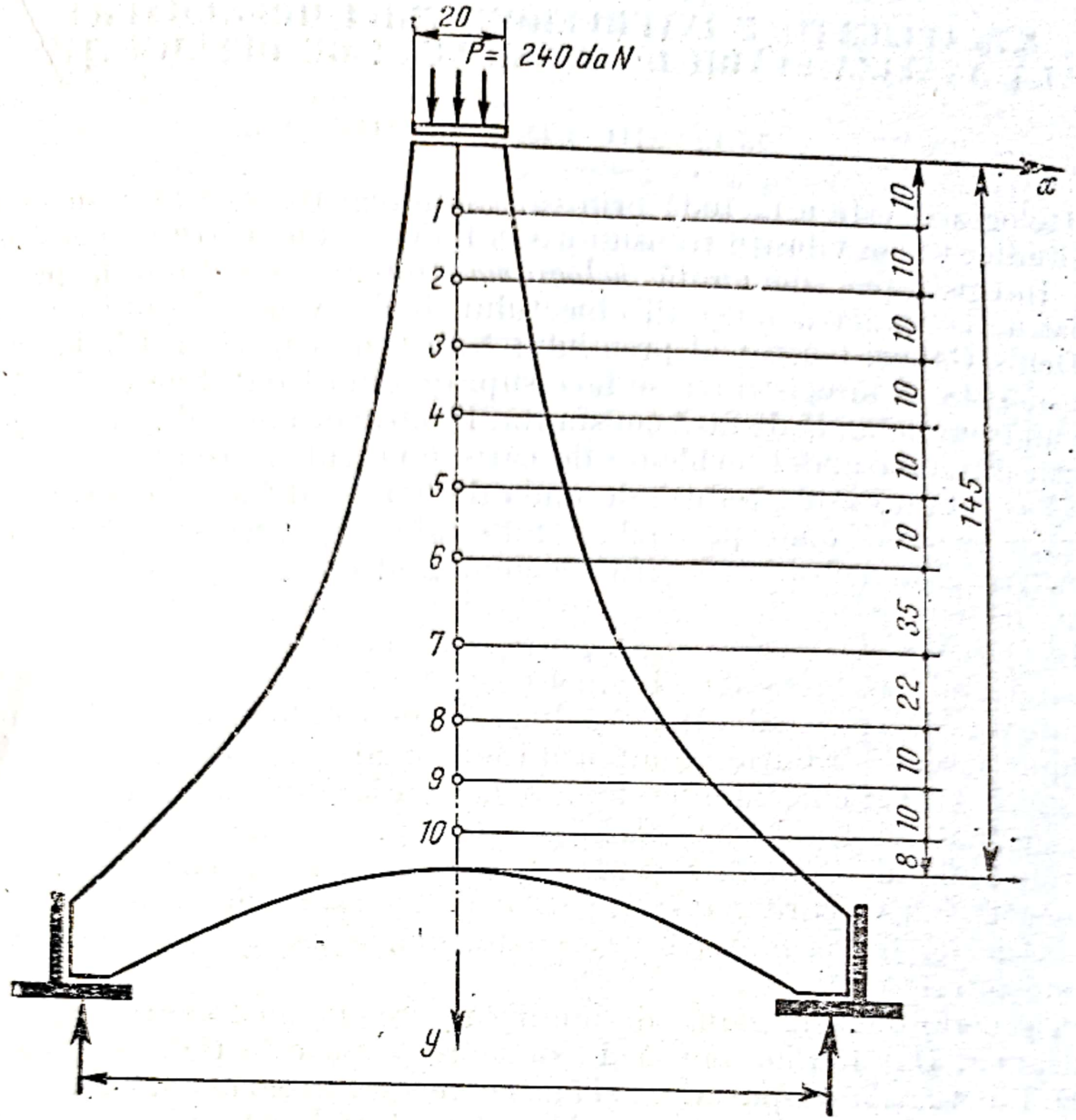


Fig. 5.75.

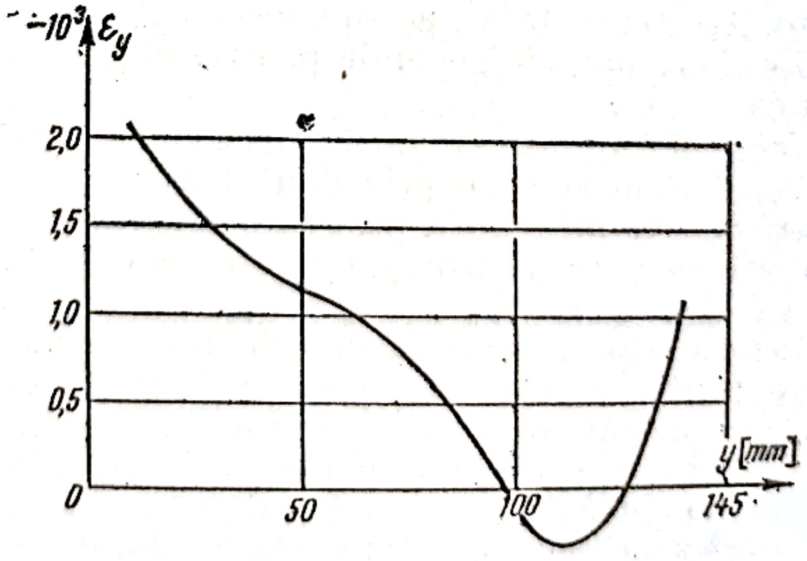


Fig. 5.76.

Scanned with OKEN Scanner

5.7. APLICAȚIILE INTERFEROMETRIEI HOLOGRAFICE LA ANALIZA STĂRII DE TENSIUNE ȘI DE DEFORMAȚIE

5.7.1. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

Holografia este o metodă prin care se înregistrează simultan faza și amplitudinea unei vibrații transmisă sau reflectată de către un corp oarecare. Inregistrarea, denumită *hologramă* (înregistrare totală), permite reconstrucția totală a imaginii obiectului, inclusiv a reliefului acestuia.

Denis Gabor, laureat al premiului Nobel, descoperitorul holografiei, arăta în 1948 că înregistrarea se face suprapunînd frontul de undă obiect peste un front de undă de fază constantă. Frontul de undă obiect este generat prin difracția undei incidente de către obiectul transparent iar unda de fază constantă este produsă de unda de bază nedifractată. Prin interferența celor două unde pe o placă fotografică se înregistra holograma. Reconstrucția undei obiect se realiza iluminînd holograma cu un fascicul de lumină coerentă.

În optica geometrică se arată, într-o primă aproximație, că variația intensității într-un fascicul de lumină poate fi descrisă ca funcție de secțiunea transversală a fasciculului. Dacă două sau mai multe fascicule de lumină sînt suprapuse, distribuția de intensitate nu mai poate fi însă descrisă în acest mod. Atunci cînd lumina de la o sursă este divizată în mod convenabil, în două fascicule, care sînt apoi suprapuse ca în cazul montajelor holografice, intensitatea în regiunea de suprapunere variază de la punct la punct între o valoare maximă, care depășește suma intensităților celor două fascicule, și una minimă care poate fi chiar zero. Acest fenomen se numește interferență.

În general două fascicule de lumină riguros monocromatice interferă întotdeauna. Dar lumina emisă de surse reale nu este riguros monocromatică. Fluctuațiile amplitudinii și fazei care apar în cazul a două fascicule emise de aceeași sursă sînt în general, corelate. Astfel de fascicule se numesc *coerente* sau *parțial coerente*, după cum această corelație este totală sau parțială. Dacă cele două fascicule provin de la surse diferite, fluctuațiile sînt independente. Asemenea fascicule sînt incoerente și nu produc interferență. Se cunosc două metode generale pentru obținerea a două fascicule de lumină coerente:

— *metoda divizării frontului de undă*, în care cele două fascicule iau naștere prin trecerea unui fascicul prin două fante foarte apropiate;

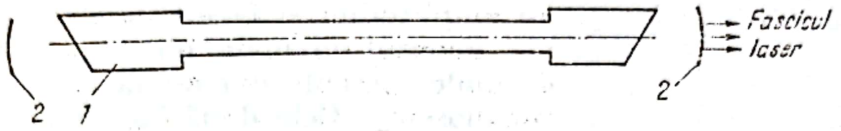
— *metoda divizării amplitudinii*, prin care fasciculul inițial este divizat în două prin reflexie și transmisie parțială, de către o lamă semitransparentă.

Pentru obținerea celor două fascicule de lumină monocromatică și coerente necesare pentru înregistrarea unei holograme este necesară o sursă de lumină corespunzătoare care să fie totodată de mare intensitate. Extinderea holografiei a fost înlesnită de descoperirea în 1961 a *laserului*, sursă de lumină monocromatică, coerentă și de mare intensitate. Finețea extremă și intensitatea deosebit de mare a fasciculului laser permit să se lucreze cu fascicule multiple și în lumină perfect paralelă.

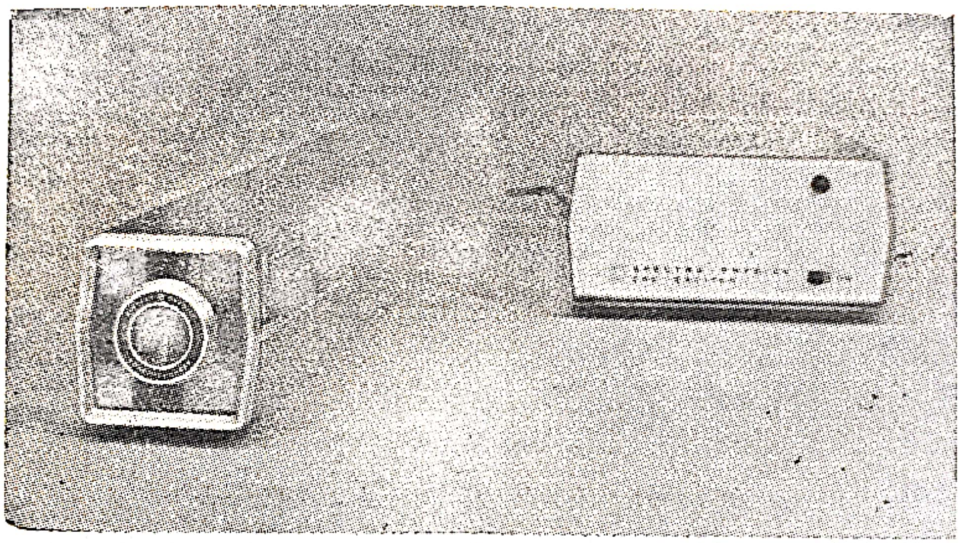
Scanned with OKEN Scanner

Emisia fasciculului laser se bazează pe fenomenul de amplificare a radiației. Pentru a se obține amplificarea radiației în mediu trebuie ca energia obținută prin emisie stimulată să depășească pe cea absorbită.

În fig. 5.77, a se prezintă schema, iar în figura 5.77, b. fotografia laserului cu He-Ne. Mediul activ, reprezentat printr-un amestec de heliu și neon, este introdus în tubul de sticlă cu ferestre înclinate 1 față de direcția de propagare a luminii în cavitate. Două oglinzi sferice 2, sînt



a



b

Fig. 5.77.

plasate pe axul tubului, la o distanță egală cu raza lor de curbură, avînd deci același focar.

Amplificarea radiației se produce în amestecul de heliu-neon pentru raportul presiunilor $p_{He}/p_{Ne} = 10$ prin descărcare electrică alimentată în curent continuu de 10 mA la o tensiune de ordinul a 2 kV. Atomii de heliu sînt excitați prin ciocniri cu electronii din descărcare. Aceștia transferă excitarea atomilor de neon care astfel emit radiația laser. Radiația laser străbate de un număr foarte mare de ori drumul dintre oglinzi, amplificîndu-se. Fasciculul laser care este emis este și liniar polarizat, avînd vectorul electric situat într-un plan normal pe planul ferestrelor.

În țara noastră cercetările în domeniul holografiei au fost inițiate și conduse de profesorul Ion Agârbiceanu, care în 1969 realizează primele holograme. Ulterior, dezvoltarea acestor cercetări a dus la crearea mai multor laboratoare de holografie în institute de cercetări și în învățămîntul superior.

Metoda reconstrucției frontului de undă consistă din două operații distincte : operația de înregistrare a informației (privind amplitudinea și faza) și operația de reconstrucție finală.

La înregistrare (fig. 5.78) pe placa fotografică H frontul de unde de referință U_r, emis de către o sursă luminoasă, punctuală și monocromatică S se suprapune peste frontul de unde U_0 emis sau reflectat de un obiect O. Frontul de referință este un front de unde coerente de amplitudini și faze cunoscute.

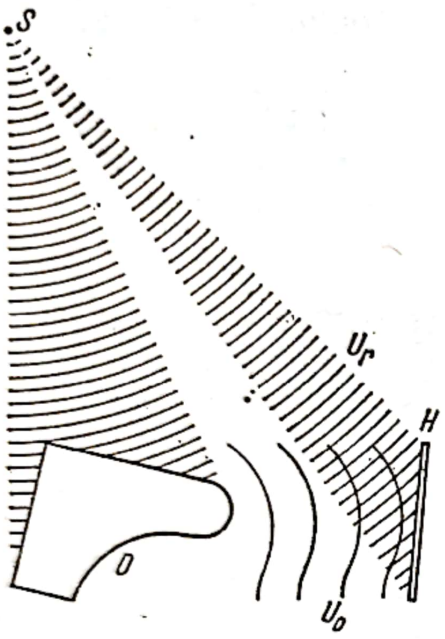


Fig. 5.78.

Frontul de unde obiect este un front de unde coerente dar de faze și amplitudini necunoscute. Cele două fascicule fiind emise de surse de lumină coerente pot interfera între ele. Fasciculul laser fiind deosebit de intens poate fi divizat în două fascicule, cu ajutorul unei semioglinzi. Cele două fascicule sînt astfel coerente.

Prin front de undă se înțelege suprafața continuă pe care sînt situate punctele la care ajung, în același timp, razele emise de o sursă.

Frontul de unde obiect care trebuie înregistrat este :

$$U_0 = a_0 \cdot e^{(-i\varphi)} \tag{5.77}$$

iar frontul de unde de referință este :

$$U_r = a_r \cdot e^{(-i\Psi)}, \tag{5.78}$$

a_0 și a_r fiind amplitudinile undelor iar φ și ψ fazele lor.

Frontul de unde rezultant este suma fronturilor componente $U_0 + U_r$ iar intensitatea cîmpului luminos :

$$I = (U_0 + U_r) \cdot (U_0^* + U_r^*), \tag{5.79}$$

unde U_0^* și U_r^* sînt conjugatele funcțiilor complexe U_0 și U_r.

Dezvoltînd cei patru termeni din relația (5.79) se obține

$$I = a_0^2 + a_r^2 + 2a_0 a_r \cos(\psi - \varphi). \tag{5.80}$$

Se observă că primii doi termeni ai expresiei (5.80) depind numai de intensitate iar al treilea termen depinde și de diferența de fază a undelor.

Se presupune că placa fotografică asigură după developare o transparență care este funcție lineară de intensitatea luminii incidente. Se admite, de asemenea, că intensitatea a_r^2 a undei de referință este uniformă pe toată suprafața plăcii fotografice. În acest caz transparența plăcii fotografice [115] este :

$$T_p = \alpha \cdot (U_r U_r^* + U_0 U_0^* + U_0 U_r^* + U_0^* U_r), \tag{5.81}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde α este o constantă care depinde de caracteristicile plăcii şi de timpul de expunere.

Reconstrucţia frontului de undă obiect se face iluminînd placa developată, cu o undă coerentă de reconstrucţie, identică cu unda de referinţă U_r.

Lumina transmisă prin transparenţă va fi :

$$U_r\, T_p = \alpha \cdot a_r^2\, U_r + \alpha \cdot a_0^2\, U_r + \alpha \cdot a_r^2\, U_0 + \alpha \cdot a_r^2\, U_0^* = \\ = A_1 + A_2 + A_3 + A_4. \tag{5.82}$$

Primii doi termeni A_1 şi A_2 nu aduc informaţii privitoare la obiect, ei nefiind altceva decît replici ale fasciculului de referinţă U_r atenuate de mărimile scalare αa_r^2 şi αa_0^2.

Termenul A_3 reprezintă frontul de undă obiect U_0 atenuat de factorul constant αa_r^2. S-a realizat deci o reconstrucţie integrală care poartă o informaţie completă privitoare la obiect : atît amplitudinea cît şi faza. Se formează imaginea virtuală I_v a obiectului aşa cum a fost văzut la înregistrare de către fiecare punct al plăcii fotografice (fig. 5.79).

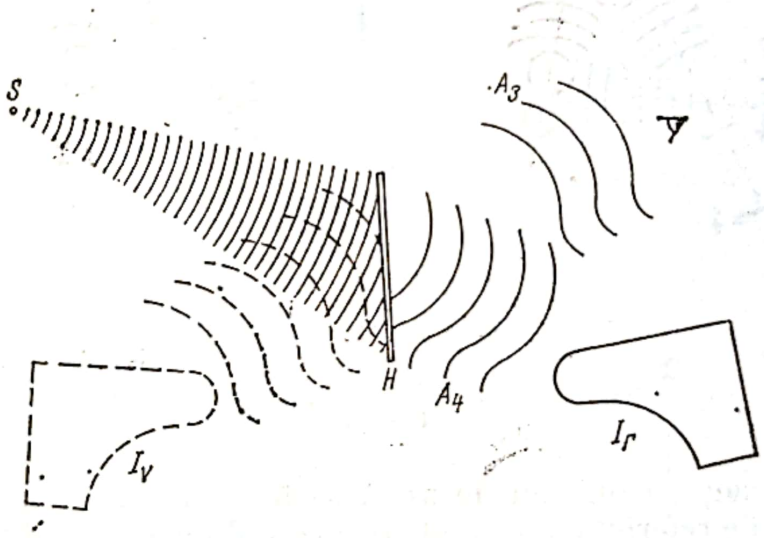


Fig. 5.79.

Termenul A_4 reprezintă frontul de undă conjugat complex frontului de undă obiect, deci o imagine reală a obiectului. Această imagine I_r este situată în faţa hologramei, ca în fig 5.79.

În fiecare punct al plăcii se înregistrează informaţii referitoare la toate punctele obiectului aşa cum sînt ele văzute din zona respectivă. Deci întregul front de undă poate fi reconstruit folosind numai o parte din hologramă, singurii factori limitativi fiind puterea de rezoluţie a peliculei fotosensibile şi unghiul sub care aceasta trebuie privit de către observator.

Scanned with OKEN Scanner

5.7.2. ÎNREGISTRAREA HOLOGRAMEI ŞI RECONSTRUCŢIA FRONTULUI DE UNDĂ

La înregistrarea hologramei se utilizează o schemă interferometrică de tipul celei reprezentate în fig. 5.80, a.

Lumina emisă de laserul (*1*) este dedublată cu ajutorul semioglinzii (*2*) în două fascicule. Fasciculul de referinţă este reflectat de oglinda (*3*), trece prin sistemul de lentile (*4*) care îl transformă într-un fascicul divergent şi ajunge la placa fotografică (*5*). Fasciculul obiect trece prin sistemul de lentile (*6*) devenind divergent; este reflectat de obiectul (*7*) şi ajunge la placa fotografică (*5*) unde interferă cu fasciculul de referinţă şi se înregistrează holograma.

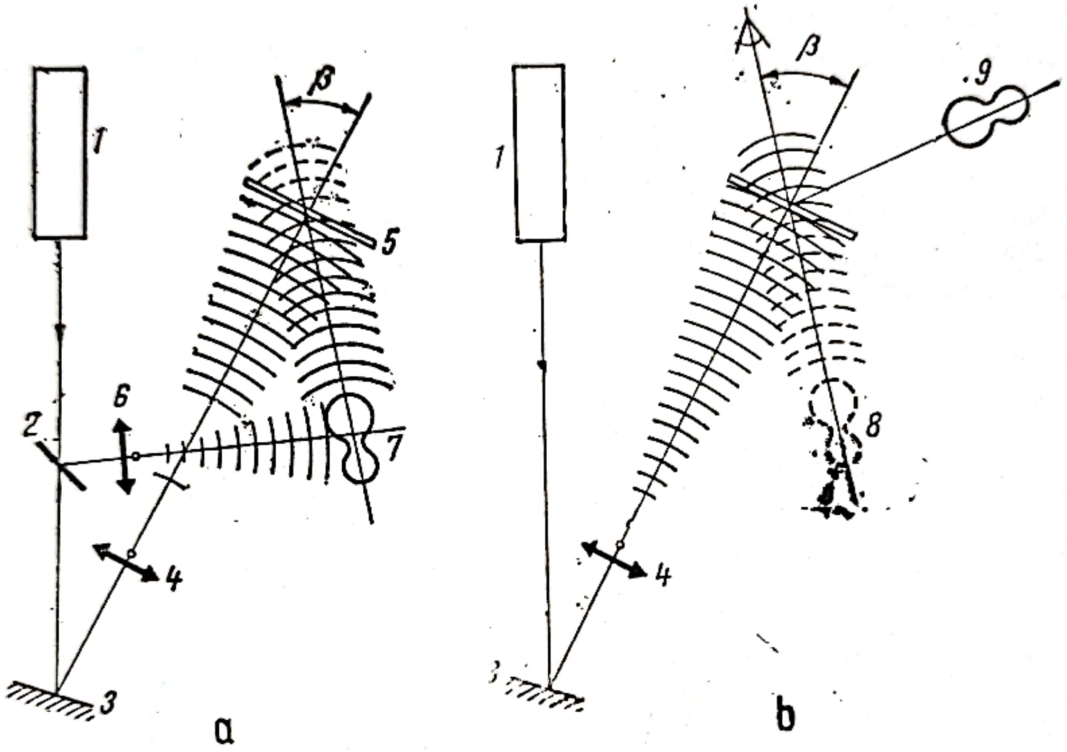


Fig. 5.80.

Reconstrucţia frontului de undă se face luminînd holograma numai cu fasciculul de referinţă (fig. 5.80, b). Privind pe aceeaşi direcţie, de unghi β cu axa optică a sistemului, se poate observa imaginea virtuală a obiectului (*8*). În (*9*) pe un ecran de sticlă difuză, numit difuzor, se poate localiza imaginea reală.

Holografia oferă trei procedee practice de a obţine franje de interferenţă şi anume : interferometria holografică *cu expunere simplă*, interferometria holografică cu *expunere dublă* şi interferometria holografică cu *expunere continuă*.

Prin procedeul interferometriei holografice cu expunere simplă se înregistrează mai întîi o hologramă a obiectului. Păstrînd obiectul nemişcat, plasînd după developare holograma exact în acelaşi loc în care a fost înregistrată şi reiluminînd obiectul şi holograma cu acelaşi fascicul de referinţă, se realizează o perfectă suprapunere a imaginii virtuale peste

Scanned with OKEN Scanner

obiectul real. În acest caz nu apare nici o franjă de interferenţă. Dacă forma obiectului suferă modificări mici în timpul examinării, datorate deformaţiilor produse de acţiunea forţelor exterioare, apar franje de interferenţă. Acest procedeu este numit în literatura de specialitate, *interferometrie holografică în timp real*. El este mai greu de realizat, practic, întrucît cere o mare precizie în fixarea poziţiei hologramei.

Prin procedeul interferometriei holografice cu *dublă expunere* două fronturi de undă obiect, înregistrate pe aceeaşi placă fotografică, în două momente diferite (înainte şi după deformarea obiectului) sînt reconstruite simultan. Informaţiile care se obţin prin examinarea franjelor de interferenţă sînt aceleaşi cu cele obţinute prin procedeul *simplei expuneri* cu diferenţa că ele se referă la modificările produse pînă la a doua înregistrare. Din punct de vedere practic procedeul are avantajul că elimină dificultăţile legate de precizia în fixarea hologramei.

Prin procedeul interferometriei holografice cu *expunere continuă*, expunerea plăcii fotografice are loc în timp ce corpul se deformează. Holograma obţinută este considerată ca o hologramă cu expuneri multiple în care numărul expunerilor tinde către infinit. Procedeul se mai numeşte şi procedeu cu *mediere în timp* şi se utilizează, mai ales, în studiul vibraţiilor.

5.7.3. FACTORII CARE INFLUENŢEAZĂ CALITATEA ÎNREGISTRĂRII UNEI HOLOGRAME

Înregistrarea unei holograme depinde de variaţia în timp a lungimii de undă a luminii emise de către laser şi de modificarea în timp a diferenţei de drum optic a celor două fascicule care interferă. Aceşti factori, care depind de condiţiile experimentale, pot produce înrăutăţirea sau pierderea totală a imaginii reconstruite. Astfel, dacă diferenţa de drum optic dintre cele două unde este de ordinul de mărime a jumătăţii lungimii de coerenţă a luminii emise şi dacă în timpul înregistrării hologramei lungimea de undă a luminii emise variază, figura de interferenţă va fi complet ştearsă. De asemenea, o modificare a lungimii cavităţii laserului, de ordinul de mărime a jumătăţii lungimii de undă a luminii, modificare ce poate apare în 2 . . . 3 secunde datorită variaţiilor termice, în cazul în care diferenţa de drum optic este egală cu lungimea cavităţii, face ca să nu apară franje de interferenţă.

Eliminarea acestor efecte se face prin utilizarea în montajul holografic a unei diferenţe de drum optic egală cu zero. Drumul optic al unui fascicul poate fi definit ca

$$\sum n_i l_i$$

unde l_i este drumul geometric străbătut de fascicul, iar n_i este indicele de refracţie al mediului străbătut. Sumarea se face asupra tuturor mediilor traversate.

Sursele reale de lumină neproducînd lumină monocromatică, cea mai fină linie spectrală prezintă o lărgime finită. În plus orice sursă fizică nu este punctuală ci constă dintr-un număr mare de emiţători. Într-un cîmp de unde monocromatice amplitudinea vibraţiilor la un punct oarecare

Scanned with OKEN Scanner

este constantă, dar faza variază linear în timp. Pentru undele reale aceste mărimi suferă fluctuaţii aleatoare dependente de lărgimea $\Delta\nu$ a spectrului. Amplitudinea complexă rămîne constantă numai într-un interval de timp Δt mic în comparaţie cu inversul lărgimii spectrale. Acest interval de timp numit *timp de coerenţă* este

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta \nu}. \tag{5.83}$$

Orice sursă de lumină emite un fascicul sub forma unui tren de unde. Lungimea unui tren de unde L care se mai numeşte *lungime de coerenţă* este

$$L = c \cdot \Delta t, \tag{5.84}$$

c fiind viteza luminii în vid.

Dacă considerăm două fascicule emise de aceeaşi sursă iar unul dintre ele prezintă o diferenţă de drum δ în raport cu celălalt, trenurile de unde nu vor fi aceleaşi dacă $\delta > L$. În acest caz cele două fascicule nu vor fi coerente între ele şi nu vor da interferenţe. Instabilitatea mecanică a diferitelor componente ale instalaţiei de înregistrare holografică provoacă variaţia în timp a diferenţei de drum dintre cele două unde. Dacă variaţia diferenţei de drum atinge valoarea jumătăţii de undă a luminii emise de laser, nu se obţin franje de interferenţă. Evitarea apariţiei acestei variaţii de drum optic se face prin instalarea întregului montaj holografic pe o masă antişoc, numită şi masă de holografie, prin evitarea curenţilor de aer în camera de lucru, prin minimizarea vibraţiilor sonore.

Cele de mai sus se referă la utilizarea laserilor cu gaz în holografie. Utilizînd un laser cu rubin care funcţionează pulsat, durata extrem de mică a impulsului ($\approx 10^{-9}$ s) face ca vibraţiile şi chiar mişcarea obiectului în timpul înregistrării să nu exercite influenţă asupra franjelor înregistrate. Acest avantaj deschide laserului cu rubin perspective importante în studiul fenomenelor tranzitorii rapide prin interferometrie holografică.

Mediul de înregistrare trebuie să fie capabil să rezolve suficient de bine informaţia astfel încît unda obiect să poată fi reconstruită.

Prin *rezoluţia unui mediu* se înţelege capacitatea mediului de a înregistra detalii fine. Rezoluţia cerută depinde de dimensiunile obiectului, tipul hologramei şi montajul experimental utilizat. Se consideră ca o măsură a rezoluţiei unui material fotosensibil numărul de franje pe mm de lungime, adică valoarea *frecvenţei spaţiale maxime* care poate fi înregistrată pentru a da imagini bune la reconstrucţie. Filmele şi plăcile fotografice sînt materialele cele mai des utilizate pentru înregistrările holografice, deşi neplanietatea optică, neliniaritatea răspunsului, sensibilitatea energetică (dependenţa transmitanţei de timpul de expunere) mică, imposibilitatea ştergerii informaţiei şi reutilizării mediului, constituie deficienţe ce nu pot fi neglijate. Emulsiile Kodak 649 F şi Agfa Gevaert 10 E 75 cele mai des utilizate în holografie ating *rezoluţii* de 2500 — 3000 linii/mm.

Scanned with OKEN Scanner

După expunere, plăcile Kodak 649 F sau Agfa 10 E 75 se introduc, timp de 2 minute, în revelator Kodak D 8 și apoi în fixator tip F5 unde sînt menținute timp de 5 ... 10 minute. Între developare și fixare plăcile sînt agitate în apă timp de 2 minute. Această operație se repetă după fixare timp de 15 minute. Developarea și fixarea se fac la o temperatură de 20°C, agitînd continuu placa.

Un developator Kodak D 8 se prepară din 750 cm³ apă la 32°C în care se dizolvă 90 g sulfit de sodiu anhidru, 45 g hidrochinonă, 37,5 g hidroxid de sodiu, 30 g bromură de potasiu. Se adaugă apoi 1000 cm³ de apă rece. Fixatorul tip Kodak F 5 se prepară din 600 cm³ de apă la 50°C în care se introduc 240 g tiosulfit de sodiu, 15 g sulfit de sodiu anhidru, 48 cm³ de acid acetic (concentrație 28%), 7,5 g acid boric (cristale), 15 g alaun de potasiu. Se adaugă apoi 1000 cm³ de apă rece.

În timpul developării se poate utiliza un filtru galben-verde situat la 1,5 m de placa ce se developează.

5.7.4. APLICAREA INTERFEROMETRIEI HOLOGRAFICE LA STUDIUL DEPLASĂRILOR

Interferometria holografică constă în a înregistra succesiv pe aceeași placă fotogafică hologramа unui corp nedeformat și hologramа aceluiași corp supus la o stare de solicitare. Placa fotografică se developează și reiluminînd-o cu ajutorul sursei de referință se reconstruiesc simultan imaginea corpului nedeformat și imaginea corpului deformat. Dacă corpul este difuzant, cele două imagini pot interfera și se obțin franje de interferență. Aceste franje depind de geometria generală a sistemului optic și de cele trei componente ale cîmpului de deplasări pentru fiecare punct a suprafeței luminate a corpului, în timpul solicitării sale.

Pentru stabilirea formulelor de calcul a deplasărilor se consideră un corp difuzant nedeformat și același corp deformat, reconstruite holografic, luminate de sursa obiect S ca în fig. 5.81.

Privind prin hologramа H se observă cu ajutorul unui sistem optic diafragmat, distribuția intensității luminoase într-un plan V. Dacă corpul suferă deplasări mici, amplitudinea luminoasă [113] în punctul I este

$$U(I) = \int_A e^{ik(r_1+r_2)}\, e^{i\Psi(Q)}\,(1 + e^{i\Delta})\,dQ \tag{5.85}$$

unde

$$\Delta = (r_1' + r_2' - r_1 - r_2)\,k, \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda}. \tag{5.86}$$

Prin λ s-a notat lungimea de undă a luminii emise de sursa luminoasă iar prin $\psi(Q)$ o funcție difuzantă.

Deplasarea $u(Q)$ a oricărui punct Q situat pe suprafața A în raport cu deplasarea $u(P)$ a unui punct P care este centrul lui A, se poate scrie

$$u_i(Q) = u_i(P) + u_{i,j}\,X_i, \tag{5.87}$$

$(X_1, X_2, 0)$ fiind coordonatele punctului Q în raport cu triedrul de referinţă centrat în P.

În cazul deformaţiilor mici relaţia (5.86) se poate scrie:

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_1, \tag{5.88}$$

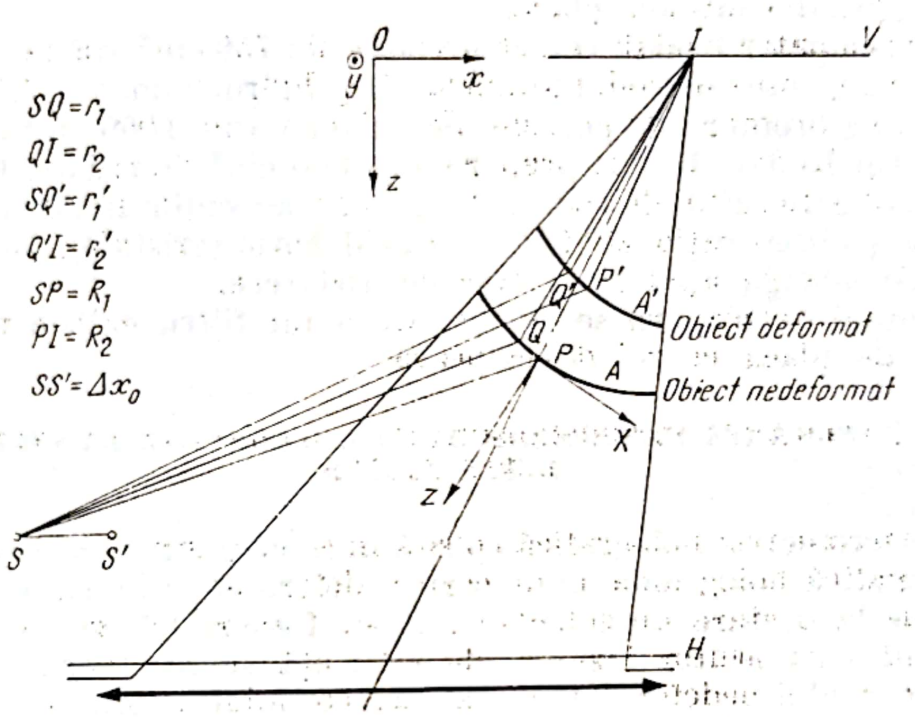


Fig. 5.81.

unde

$$\Delta_0 = \frac{2\pi}{\lambda}\left[u_i\left(\frac{X_i^I}{R_2} - \frac{X_i^S}{R_1}\right)\right], \tag{5.89}$$

$$\Delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}\left[(u_i + u_{i,j}\,X_j)X_i\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) + u_{i,j}\,X_j\left(\frac{X_i^I}{R_1} - \frac{X_i^S}{R_2}\right)\right]. \tag{5.90}$$

Se constată că Δ_0 nu depinde de X_i iar Δ_1 este un infinit mic de ordin superior faţă de Δ_0. Din această cauză Δ_0 determină forma franjelor de interferenţă iar Δ_1 determină contrastul franjelor şi planul de maxim contrast al franjelor.

Dacă $e^{i\Delta_1} = 1$ în orice punct Q de pe suprafaţa A, relaţia (5.85) se poate scrie

$$U(I) = (1 + e^{i\Delta_0}) \cdot \int_A e^{ik(r_1+r_2)}\, e^{i\Psi(Q)}\, dQ \tag{5.91}$$

iar intensitatea luminoasă în punctul I este

$$|U(I)|^2 = \left\{1 + \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}\,u_i\left(\frac{X_i^I}{R_2} - \frac{X_i^S}{R_1}\right)\right]\right\}\left|\int_A e^{ik(r_1+r_2)}\, e^{i\Psi(Q)}\, dQ\right|^2. \tag{5.92}$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru apariția unei franje de intensitate minimă trebuie satisfăcută condiția :

$$\Delta_0 = (2N + 1)\pi, \tag{5.93}$$

unde $N = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$ reprezintă ordinul franjei întunecate.

Înlocuind expresia (5.93) în relația (5.89) se obține

$$u_i \left(\frac{X_i^I}{R_2} - \frac{X_i^S}{R_1} \right) = \left(N + \frac{1}{2} \right) \lambda. \tag{5.94}$$

Relațiile de trecere de la sistemul de coordonate local $OXYZ$ la un sistem de coordonate fix $Oxyz$ sînt :

$$X_i = \alpha_{ij} (x_j - x_j^P), \tag{5.95}$$

$$u_i = \alpha_{iP} U_P. \tag{5.96}$$

În relațiile (5.95) și (5.96) α_{ij} sînt funcții care depind de forma corpului iar U_P reprezintă componentele vectorului deplasării punctului P în triedrul fix $Oxyz$.

Utilizînd relațiile (5.95) și (5.96) relația (5.94) devine

$$U_P \cdot \alpha_{iP} \cdot \alpha_{ij} \left(\frac{x_j^I - x_j^P}{R_2} - \frac{x_j^S - x_j^P}{R_1} \right) = \left(N + \frac{1}{2} \right) \lambda. \tag{5.97}$$

Se constată că în cazul unui corp tridimensional trebuie ca la interpretarea franjelor de interferență obținute să se țină seama și de efectele de perspectivă ale corpului precum și de geometria acestuia. Relația (5.97) este mai ușor de interpretat atunci cînd corpul de studiat este plan și perpendicular pe axa optică (fig. 5.82).

În acest caz relația (5.97) se poate scrie sub forma :

$$\begin{aligned} &u_1 \left(\frac{x_1^I - x_1^P}{R_2} - \frac{x_1^S - x_1^P}{R_1} \right) + u_2 \left(\frac{x_2^I - x_2^P}{R_2} - \frac{x_2^S - x_2^P}{R_1} \right) + \\ &+ u_3 \left(\frac{x_3^I - x_3^P}{R_2} - \frac{x_3^S - x_3^P}{R_1} \right) = \left(N + \frac{1}{2} \right) \lambda. \end{aligned} \tag{5.98}$$

Dacă corpul suferă o deplasare u_0 în planul său, în lungul axei OX (fig. 5.82) ecuația (5.98) devine :

$$u_0 \left(\frac{x_1^I - x_1^P}{R_2} - \frac{x_1^S - x_1^P}{R_1} \right) = \left(N + \frac{1}{2} \right) \lambda. \tag{5.99}$$

Scanned with OKEN Scanner

Franjele vor avea contrastul maxim într-un plan situat în apropierea corpului, unde relaţia (5.99) devine :

$$u_0 \cdot \left[x_1^I \cdot \frac{l_2 + l_0}{(l_0 + l_1)\, l_2} - \frac{x_1^S}{l_2} \right] = \left(N + \frac{1}{2} \right) \lambda. \qquad (5.100)$$

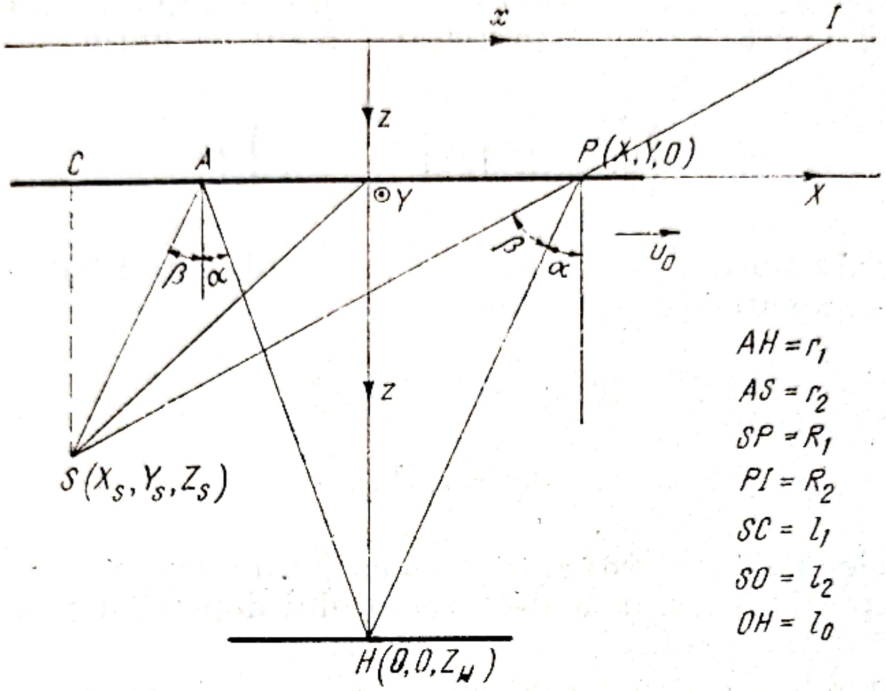


Fig. 5.82.

Franjele care apar sînt deci franje echidistante şi paralele cu axa *Oy*, ca în fig. 5.83 iar distanţa dintre franje este

$$d = \frac{l_2 (l_0 + l_1) \lambda}{u_0 (l_2 + l_0)}. \qquad (5.101)$$

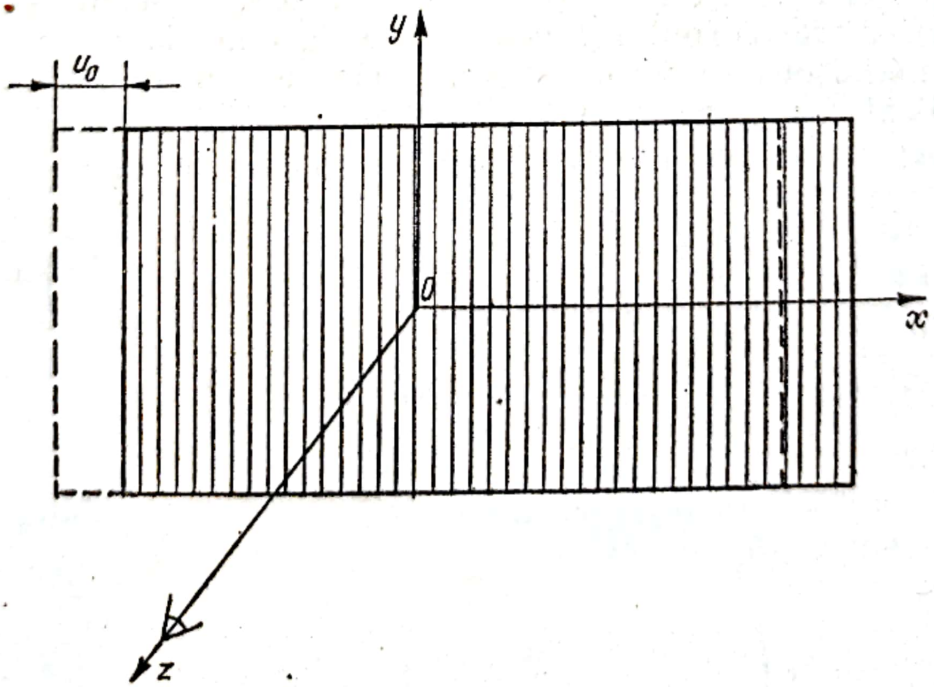


Fig. 5.83.

Scanned with OKEN Scanner

O rotație θ a corpului în jurul unei axe aflată în planul său produce franje care au contrastul maxim într-un plan situat chiar pe obiect.

Franjele au ecuația:

$$-\theta x\left(\frac{Z^S}{R_1}\right)=\left(N+\frac{1}{2}\right)\lambda. \tag{5.102}$$

Dacă R_1 nu variază prea mult, franjele obținute vor fi paralele cu axa Oy (fig. 5.84) iar distanța dintre franje va fi:

$$d=\frac{\lambda R_1}{Z^S\,\theta}. \tag{5.103}$$

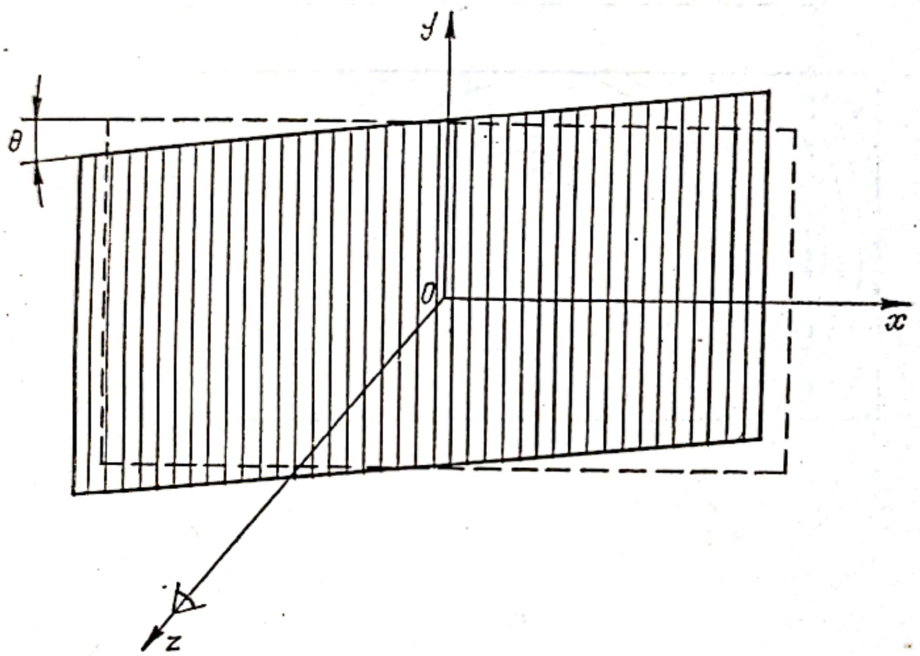


Fig. 5.84.

O rotație a corpului în jurul unei axe paralele cu direcția de observare dă naștere la franje paralele (ca cele din fig. 5.84). Orientarea și distanța dintre franje variază însă în planul hologramei.

Dacă corpul suferă o deplasare w în lungul axei Oz franjele care apar sînt o familie de cercuri, ca în fig. 5.85.

În cazul plăcilor solicitate la încovoiere $u_1 = u_2 = 0$. Folosind notațiile din fig. 5.82 și utilizînd relația (5.89) se obține:

$$\Delta_0=-w\left(\frac{Z_i^H-Z_i^A}{r_1}-\frac{Z_i^S-Z_i^A}{r_2}\right)\frac{2\pi}{\lambda}, \tag{5.104}$$

sau

$$\Delta_0=-w\,(\cos\alpha+\cos\beta)\,\frac{2\pi}{\lambda}. \tag{5.105}$$

Condiția necesară pentru apariția unui franj întunecat

$$\frac{2\pi}{\lambda}(\cos\alpha + \cos\beta) = (2N+1)\pi. \tag{5.106}$$

Din relația (5.106) rezultă :

$$w = \frac{(2N+1)\lambda}{2(\cos\alpha + \cos\beta)}. \tag{5.107}$$

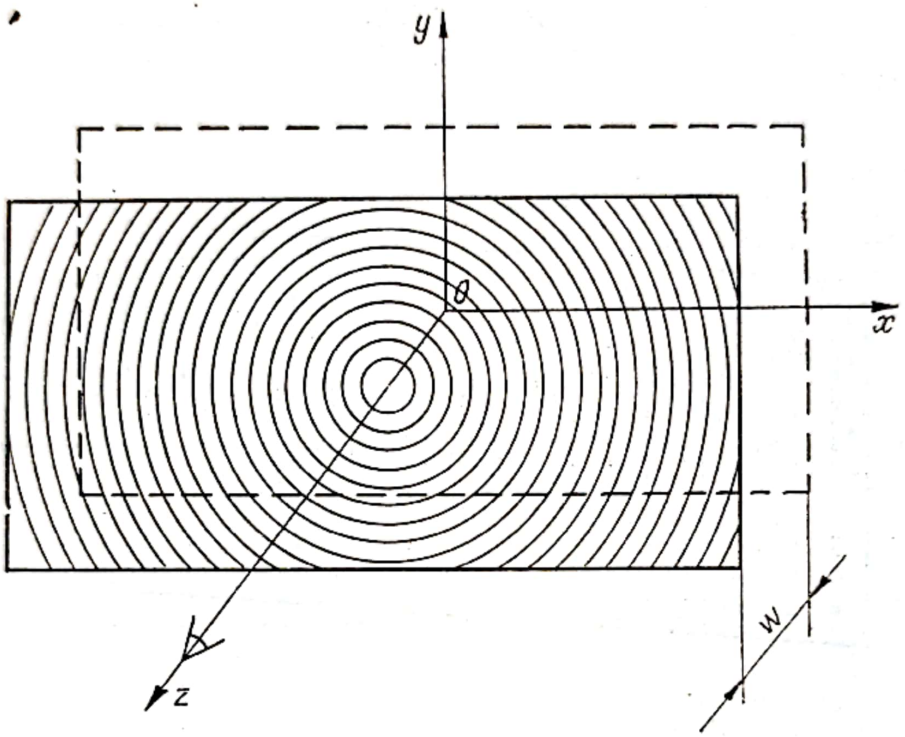


Fig. 5.85.

Deci franjele obținute prin interferometrie holografică, în cazul unei plăci plane solicitată la încovoiere, sînt curbe de egală deplasare w și au ca ecuație expresia (5.107).

Deplasările unui punct, în cazul general de deformare a corpului, nu se pot studia pe baza interpretării după o singură direcție a franjelor obținute. Cîteva din procedeele [108], [113] de determinare a deplasărilor unui punct aparținînd unui corp deformat pornesc de la relația (5.94) scrisă sub forma :

$$-u(n_1 + n_2) = \left(N + \frac{1}{2}\right)\lambda, \tag{5.108}$$

unde n_1, și n_2 sînt vectorii unitari reprezentați pe fig. 5.86.

În montajul utilizat (fig. 5.86) sînt introduse două semioglinzi (*1*) și (*2*) care permit obținerea a trei fascicule luminoase. Aceste fascicule sînt reflectate de către oglinzile plane (*3*), (*4*) și transformate în fascicule divergente cu ajutorul obiectivelor de microscop (*5*), (*6*), (*7*). Două din

aceste fascicule, reprezentînd fasciculele de referinţă, luminează plăcile fotografice (*8*), (*9*) care fac între ele un unghi de 90°. Al treilea fascicul luminează corpul de studiat (*10*). Lumina difuzată de corpul de studiat (*10*) interferă cu fasciculele de referinţă pe cele două plăci fotografice, înregistrîndu-se două holograme. Aplicînd metoda dublei expuneri celor

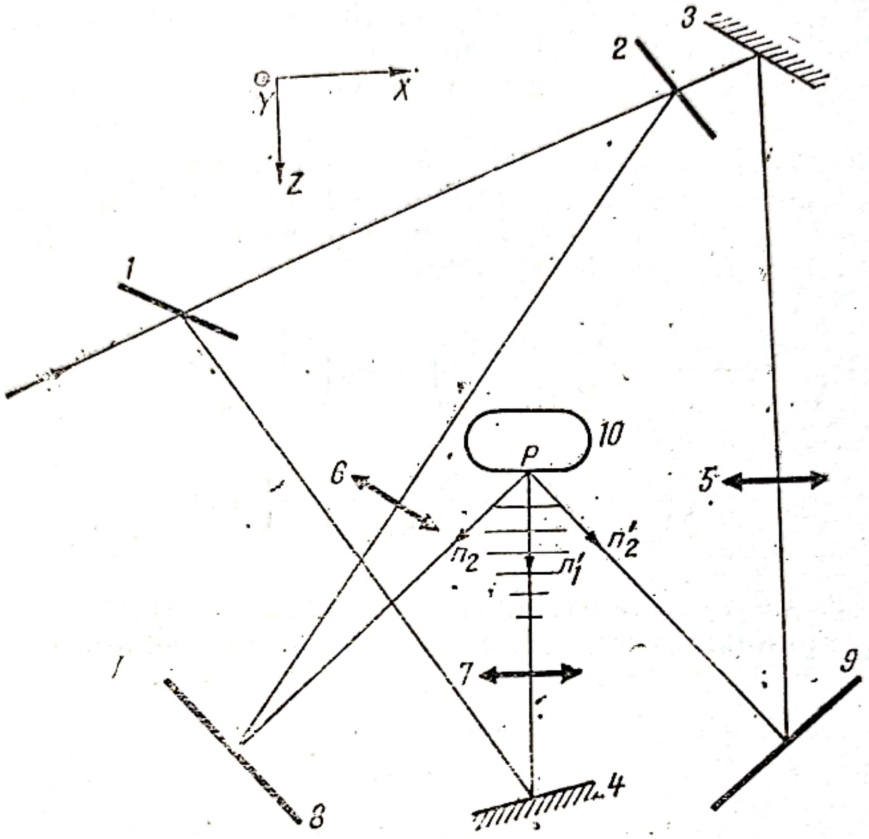


Fig. 5.86.

două holograme, pentru corpul nedeformat şi pentru corpul deformat, observînd franjele şi ţinînd seama de relaţia (5.108) se obţine

$$-u(n_1+n_2)=\left(N+\frac{1}{2}\right)\lambda, \tag{5.109}$$

pentru holograma (*8*), respectiv

$$-u(n_1+n_2')=\left(N'+\frac{1}{2}\right)\lambda, \tag{5.110}$$

pentru holograma (9).

Presupunînd că distanţele dintre holograme şi obiect, cu alte cuvinte că direcţiile n_1, n_2, n_2' sînt constante indiferent care este poziţia punctului P, rezultă din relaţiile (5.109) şi (5.110):

$$\frac{2}{2}u_x-u_z\left(1+\frac{2}{2}\right)=\left(N+\frac{1}{2}\right)\lambda, \tag{5.111}$$

$$-\frac{2}{2}u_x-u_z\left(1+\frac{2}{2}\right)=\left(N'+\frac{1}{2}\right)\lambda, \tag{5.112}$$

Scanned with OKEN Scanner

și făcînd diferența între relațiile (5.111) și (5.112) se obține :

$$2u_x = N'' \lambda. \tag{5.113}$$

Cunoscînd deci diferența $N - N'$ se poate obține deplasarea u_x în orice punct al corpului și printr-o experiență similară se poate obține deplasarea u_y. La acest procedeu direcțiile n_1, n_2, n_2', sînt cunoscute și fixe. Dar există greutăți în determinarea semnului diferenței $(N' - N)$. Procedeul necesită două holograme. Totodată acest procedeu este punctual.

Ebbeni [113] folosește o tehnică ce combină efectul moiré cu holografia în scopul determinării cîmpului deplasărilor în tot corpul.

Dacă sursa obiect (fig. 5.81) este deplasată cu o cantitate Δx_0, în lungul axei Ox, relația (5.98) devine

$$u_1 \left(\frac{x_1^I - x_1^P}{R_2} - \frac{x_1^S + \Delta x_0 - x_1^P}{R_1} \right) + u_2 \left(\frac{x_2^I - x_2^P}{R_2} - \frac{x_2^S - x_2^P}{R_1} \right) +$$

$$+ u_3 \left(\frac{x_3^I - x_3^P}{R_2} - \frac{x_3^S - x_3^P}{R_1} \right) = \left(N' + \frac{1}{2} \right) \lambda. \tag{5.114}$$

Familiile de franje reprezentate de ecuațiile (5.98) și (5.114) reprezintă rețele. Suprapunînd aceste rețele, se obțin franje moiré de ecuație

$$u_1 \frac{\Delta x_0}{R_1} = N'' \lambda, \tag{5.115}$$

unde $N'' = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$

Dacă R_1 este constant, franjele moiré rezultate sînt linii de egală deplasare u_1. Densitatea acestor franje poate fi reglată prin variația deplasării Δx_0.

Deplasînd sursa obiect pe cele trei direcții se pot obține, succesiv, valorile deplasării u_i în orice punct al corpului. Procedeul elimină principalele influențe ale rotațiilor pe care le poate suferi modelul în jurul axelor situate în planul său.

În concluzie, interferometria holografică aplicată la studiul deplasărilor corpurilor difuzante prezintă următoarele avantaje :

— contactul cu corpul de studiat nu este necesar,

— franjele obținute sînt vizibile pe toată suprafața corpului,

— sensibilitatea mare a metodei permite măsurarea unor deplasări extrem de mici (de ordinul jumătății lungimii de undă a luminii utilizate). Trebuie însă menționat că datorită sensibilității mari a metodei, deplasările corpului nu trebuie să depășească cîteva zeci de microni,

— corpurile de studiat pot avea dimensiuni relativ mari și nu necesită o pregătire specială.

Scanned with OKEN Scanner

Totodată metoda prezintă şi unele dezavantaje dintre care se menţionează :

— interpretarea directă a franjelor în cazul general al stării de deformaţie nu este, în prezent, posibilă.

— deplasările de rigid ale corpului datorate unor sisteme defectuoase de prindere a corpului sau de aplicare a sarcinii produc franje parazite care falsifică rezultatele măsurărilor.

Aplicaţie. În figura 5.87,a se prezintă montajul experimental utilizat [108] pentru studiul deplasărilor unei plăci circulare perforată prin patru găuri iar în fig. 5.87, b fotografia acestui montaj. Placa este rezemată pe contur şi încărcată cu o forţă concentrată centrală F.

Montajul experimental utilizează un laser (*1*), trei oglinzi plane (*2*, *3*, *4*), o semioglindă (*5*), două obiective de microscop (*6*) şi (*7*), trei diafragme (*8*), (*9*) şi (*10*), placa fotografică (*11*) şi placa perforată (*12*) ce urmează a fi studiată. Vibraţiile parazite care ar putea perturba măsurările au fost evitate prin plasarea întregului montaj pe o masă holografică.

Pentru studiul deplasărilor s-a folosit procedeul dublei expuneri. Prin acest procedeu două fronturi de undă obiect înregistrate pe o aceeaşi placă fotografică, înainte şi după deformarea plăcii de studiat, sînt reconstruite simultan. Fiecare înregistrare se face utilizînd o schemă interferometrică. Lumina emisă de laserul (*1*) este reflectată de către oglinda (*2*) spre semioglinda (*5*) care dedublează fasciculul emis în alte două fascicule.

Fasciculul de referinţă este reflectat de către oglinda (*3*), trece prin obiectivul de microscop (*6*), care-l transformă într-un fascicul divergent şi ajunge la placa fotografică (*11*).

Fasciculul obiect este reflectat de către oglinda (*4*), transformat într-un fascicul divergent de către obiectivul de microscop (7) şi, reflectat de placa perforată, ajunge la placa fotografică (*11*) unde interferă cu fasciculul de referinţă. Astfel se înregistrează holograma. Razele parazite sînt eliminate prin introducerea în montajul optic a diafragmelor (*8*), (*9*) şi (*10*).

Reconstruirea frontului de undă obiect pentru cele două situaţii ale plăcii (nedeformată şi deformată) se face luminînd holograma obţinută numai cu fasciculul de referinţă. Din interferenţa celor două fronturi de undă obiect rezultă franje care sînt curbe de egală deplasare a punctelor plăcii şi au ca ecuaţie relaţia (5.107).

Sistemul de rezemare a plăcii şi dispozitivul de aplicare a sarcinii trebuie să fie foarte rigide pentru a evita deplasarea ca rigid a plăcii care introduce franje în plus.

În fig. 5.88 se prezintă franjele obţinute pentru placa circulară perforată prin patru găuri iar în fig. 5.89 variaţia raportului săgeţilor plăcii w/w_{max} în lungul axei Ox, ca urmare a interpretării franjelor.

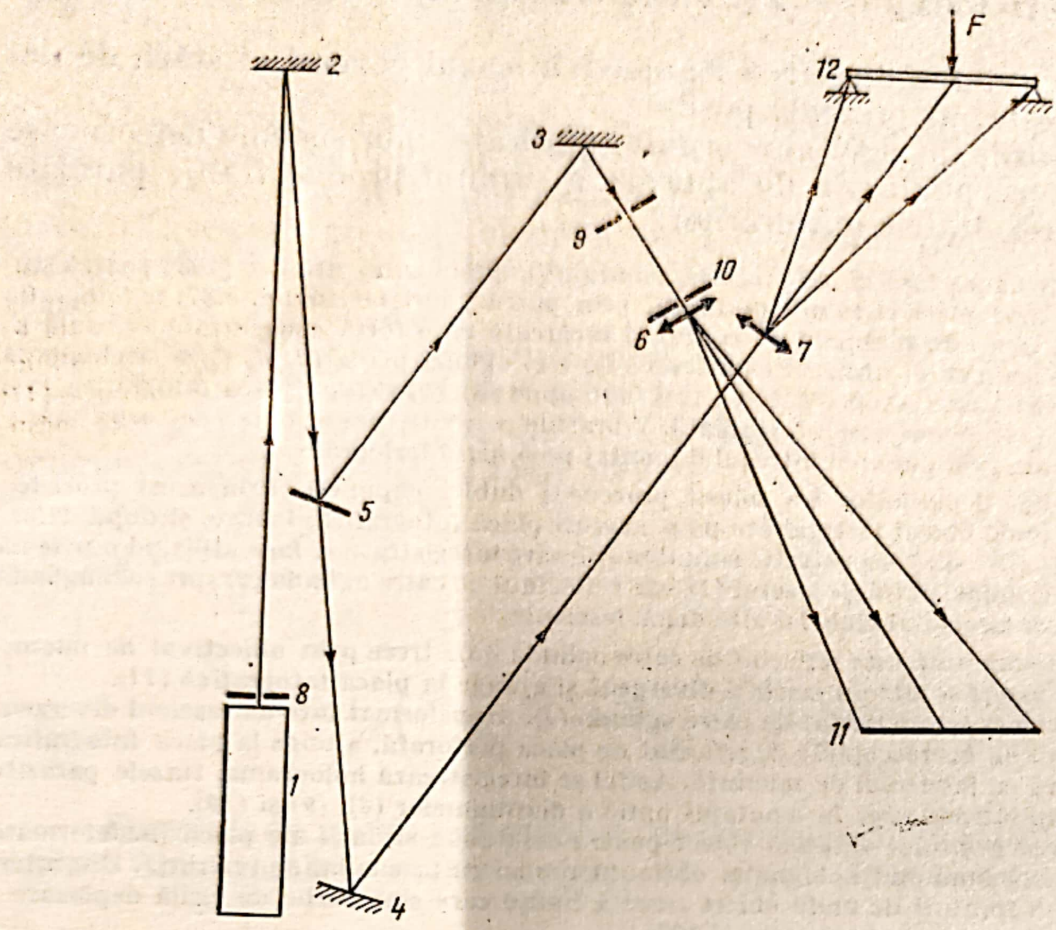
5.7.5. UTILIZAREA HOLOGRAFIEI LA STUDIUL STĂRII DE TENSIUNE

În analiza experimentală a stării de tensiune fotoelasticitatea dă posibilitatea obţinerii izocromatelor şi a izoclinelor. Integrarea numerică sau grafică reprezintă procedee prin care se poate determina complet starea de tensiune din modelul fotoelastic. Pentru a elimina erorile care provin din integrarea numerică sau grafică se caută să se determine izopachele prin experienţe complementare.

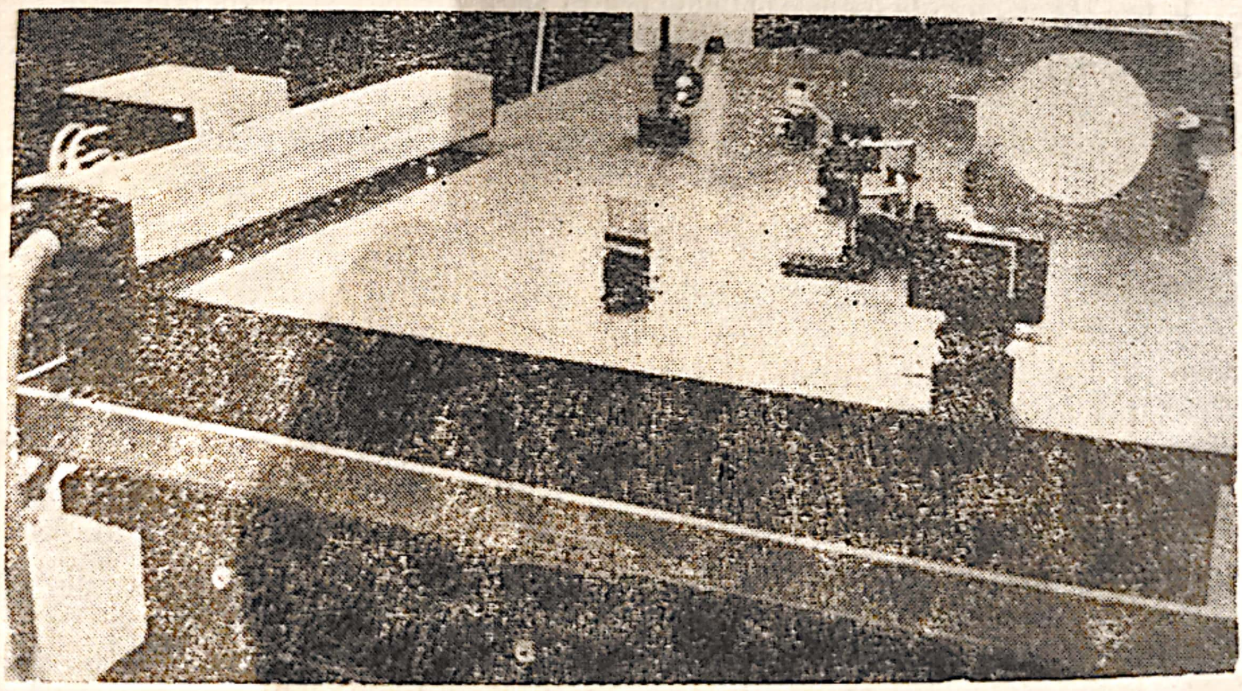
Prin interferometrie holografică este posibil ca pe un acelaşi model, confecţionat dintr-un material fotoelastic, să se obţină izocromatele şi izopachele pe o aceeaşi fotografie sau separat izocromatele, izopachele sau izoclinele, ceea ce permite să se determine în întregime starea de tensiune din model. În acest scop poate fi utilizat montajul din fig. 5.90.

Fasciculul emis de laserul (*1*) este divizat de semioglinda (*2*) în două fascicule. Fasciculul de referinţă porneşte de la semioglinda (*2*) este reflectat de oglinzile (*3*) şi (*4*), este polarizat circular prin trecerea prin

Scanned with OKEN Scanner



a)



b)

Fig. 5.87.

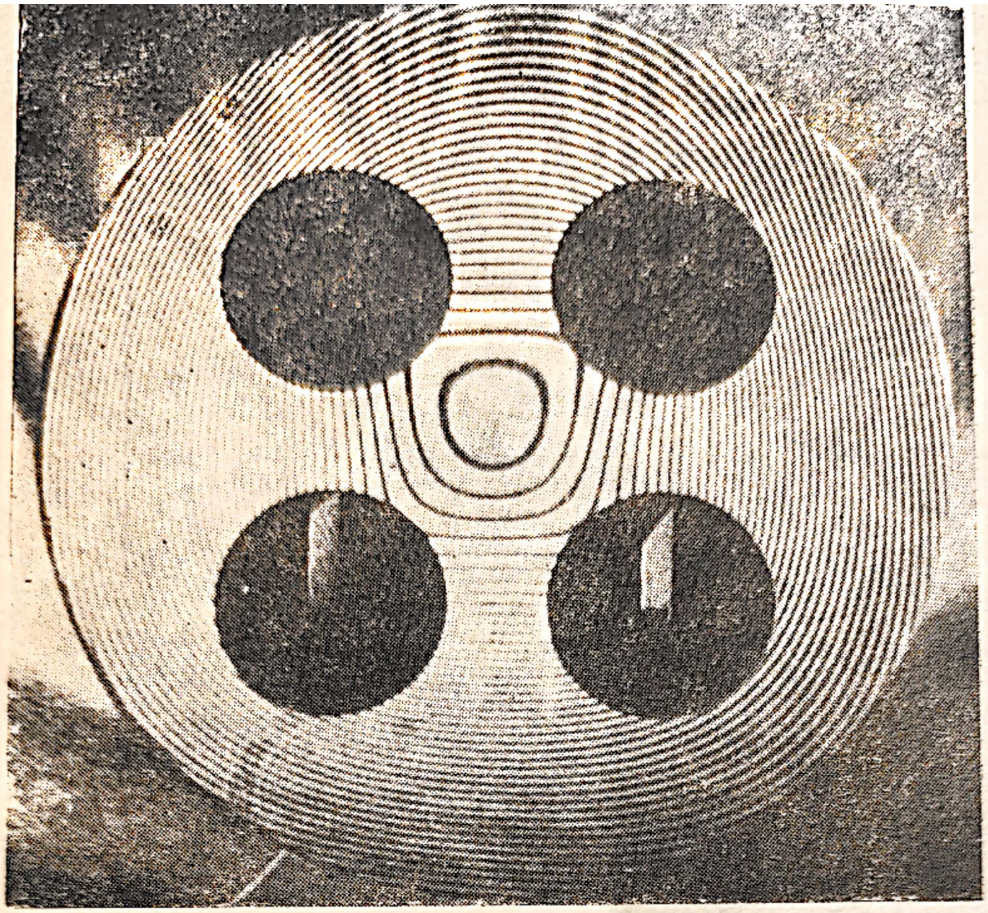


Fig. 5.88.

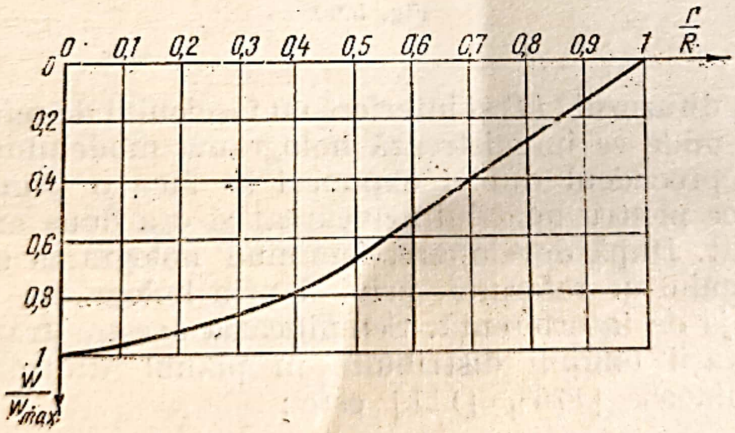


Fig. 5.89.

ansamblul polarizor-lamă sfert de undă (*5*), transformat într-un fascicul divergent de către obiectivul de microscop (*6*) și luminează placa fotografică (*7*).

Fasciculul obiect pornește de la semioglindă (*2*), este reflectat de oglinda (*8*), polarizat circular prin trecerea prin ansamblul polarizor-

lamă sfert de undă (*9*), transformat într-un fascicul divergent de către obiectivul de microscop (*10*), trece prin filtrul spaţial (*11*) şi sistemul de lentile (*12*) care-l transformă într-un fascicul paralel, străbate modelul

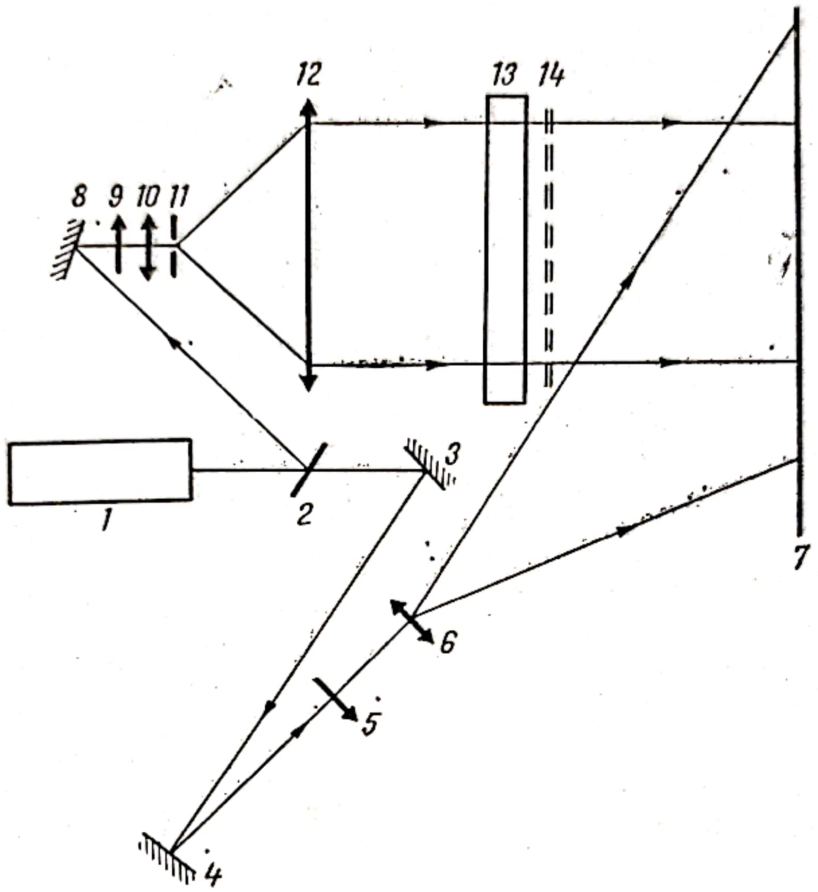


Fig. 5.90.

fotoelastic (*13*), difuzorul (*14*) şi interferă cu fasciculul de referinţă pe placa fotografică (*7*) unde se înregistrează holograma modelului.

Utilizînd procedeul dublei expuneri se face o primă expunere a plăcii fotografice pentru modelul neîncărcat şi o a doua expunere pentru modelul încărcat. După developare, luminînd holograma astfel obţinută, numai cu fasciculul de referinţă, privind prin hologramă se vor observa pe difuzor franje de interferenţă. Semnificaţia acestor franje rezultă din studiul intensităţii luminii distribuite în planul difuzorului. Expresia intensităţii luminoase [116], [117] este:

$$I \approx 1 + \cos\left[\frac{Kh}{2} C(\sigma_1 - \sigma_2)\right]\left\{\cdot(C_1 + C_2)\cdot 2\cos(\sigma_1+\sigma_2) - \right.$$

$$\left. -\frac{2\mu}{E}(n_0 - 1)\frac{Kh}{2}\right] + \cos\left[\frac{Kh}{2} C(\sigma_1 + \sigma_2)\right]\Bigg\}. \qquad (5.116)$$

Scanned with OKEN Scanner

În relaţia (5.116) s-a notat :

$K = \frac{2\pi}{\lambda}$,
h = grosimea modelului,
n_0 = indicele de refracţie al modelulului nesolicitat,
μ, E = constantele elastice ale materialului fotoelastic,
σ_1, σ_2 = tensiunile principale din punctul considerat al modelului,
C_1, C_2 = coeficienţii de efort optic,
$C = C_1 - C_2$.

Pe imaginea proiectată a modelului se vor vedea două familii de curbe; izocromatele caracterizate prin $\sigma_1 - \sigma_2 = \text{ct.}$ şi izopachele caracterizate prin $\sigma_1 + \sigma_2 = \text{ct.}$

Notînd

$$\frac{Kh}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\,C = a,$$

$$\frac{Kh}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)\cdot\left[(C_1 + C_2) - \frac{2\mu}{E}(n_0 - 1)\right] = b,$$

expresia (5.116) devine :

$$I \approx 1 + 2\cos a \cdot \cos b + \cos^2 a. \tag{5.117}$$

Dacă $\cos a = 0$, intensitatea este constantă şi egală cu 1. Această condiţie este îndeplinită în punctele pentru care

$$\frac{Kh}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)C = (2m + 1)\frac{\pi}{2}, \tag{5.118}$$

sau

$$\frac{2\pi}{2\lambda}h\,(\sigma_1 - \sigma_2)C = (2m + 1)\frac{\pi}{2}. \tag{5.119}$$

Din relaţia (5.119) rezultă

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N_1\frac{\lambda}{hC} \cdot (N_1 = \pm 0{,}5\,;\ \pm 1{,}5\,;\ \pm 2{,}5\ \ldots) \tag{5.120}$$

Prin urmare franjele de intensitate egală cu 1 sînt izocromate.
Dacă $\cos b = 1$ expresia (5.117) devine

$$I \approx (1 + \cos a)^2. \tag{5.121}$$

Scanned with OKEN Scanner

Relaţia (5.121) este valabilă cînd

$$\frac{Kh}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)\cdot(C_1 + C_2 - \frac{2\mu}{E}(n_0 - 1) = 2m\pi, \qquad (5.122)$$

deci pentru

$$\sigma_1 + \sigma_2 = N_2\frac{\lambda}{h(C_1 - C_2)} \quad (N_2 = 0\,;\pm 2\,;\ \pm 4\ \ldots.). \qquad (5.123)$$

Dacă cos $b = -1$ expresia (5.117) devine

$$I \approx (1 - \cos\ a)^2. \qquad (5.124)$$

Relaţia (5.124) este valabilă cînd

$$\frac{Kh}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)\left[(C_1 + C_2) - \frac{2\mu}{E}(n_0 - 1)\right] = (2m + 1)\,\pi, \qquad (5.125)$$

deci pentru

$$\sigma_1 + \sigma_2 = N_2'\frac{\lambda}{hC}\cdot (N'_2 = \pm 1\,;\ \pm 3\,;\ \pm 5\,;\ \ldots) \qquad (5.126)$$

Ca urmare curbele date de ecuaţiile (5.123) şi (5.126) sînt izopache.

În relaţiile (5.123) şi (5.126) s-a neglijat termenul $\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{E}\mu$ care este foarte mic în comparaţie cu unitatea.

Mergînd în lungul unei izopache, cos $b = 1$, se observă că intensitatea devine nulă pentru cos $a = -1$, ia valorile $I = 1$ pentru cos $a = 0$ şi $I = 4$ pentru cos $a = 1$. Condiţia cos $a = 0$ defineşte curbele izocromate şi rezultă că izopacha cos $b = 1$ traversînd o izocromată îşi schimbă intensitatea de la 0 la 4. Izopacha alăturată cos $b = -1$ este întunecată acolo unde izopacha cos $b = 1$ este luminoasă şi invers, ca în fig. 5.91.

Deci prin interferometrie holografică este posibil ca toate informaţiile privind starea de tensiune să fie înregistrate pe o singură fotografie. Cunoscînd în punctele de intersecţie atît suma $(\sigma_1 + \sigma_2)$ cît şi diferenţa $(\sigma_1 - \sigma_2)$ se pot determina tensiunile principale σ_1 şi σ_2. Pentru a se putea distinge izocromatele de izopache, acestea trebuie să se intersecteze sub un unghi apropiat de $\frac{\pi}{2}$.

Dacă lumina este polarizată circular în sens contrar, pe difuzor vor apare numai izocromate.

Dacă unul din fascicule este polarizat plan, ceea ce se poate realiza prin scoaterea din montajul prezentat în fig. 5.90 a unei lame sfert de undă, pe imaginea proiectată a modelului pe difuzor vor apare numai izopache.

Scanned with OKEN Scanner

De asemenea, dacă modelul este confecţionat dintr-un material cu slabe proprietăţi fotoelastice, franjele care vor apare vor fi numai izopache indiferent de modul de polarizare a luminii.

Familiile de izocromate şi izopache se pot obţine pe o aceiaşi fotografie, sau separat, şi prin procedeul interferometric în timp real. În acest caz se înregistrează o hologramă a modelului fotoelastic nesolicitat. Deve-

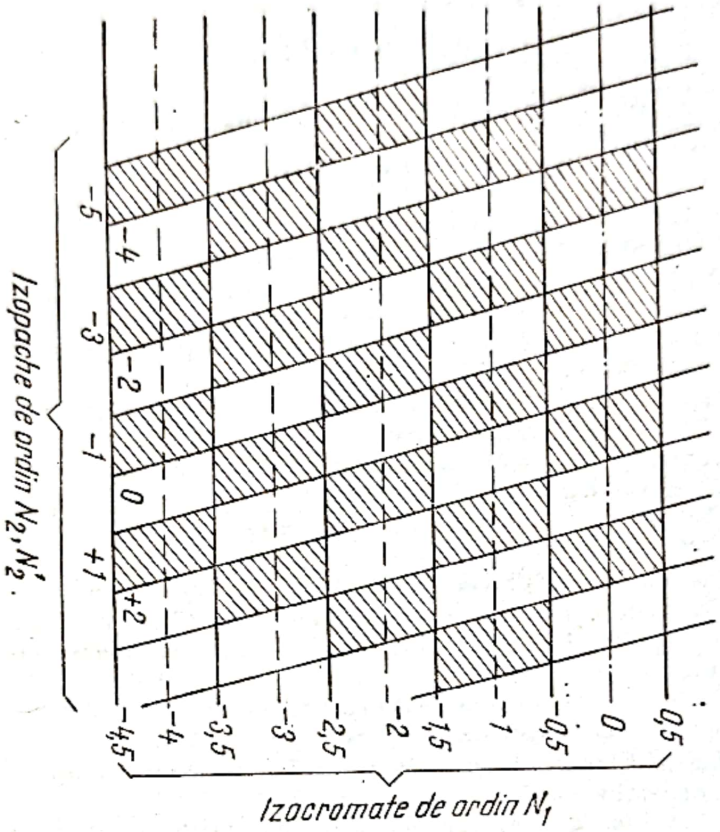


Fig. 5.91.

lopînd hologrāma şi plasînd-o în acelaşi loc în care a avut loc înregistrarea se reconstruieşte pe difuzor imaginea modelului. Suprapunînd imaginea reală a modelului peste cea obţinută la reconstrucţie, pe difuzor nu se vor observa franje. Dacă modelul va fi încărcat, pe difuzor vor apare franje care au aceleaşi proprietăţi cu cele expuse mai înainte. O aplicaţie privind analiza stării de tensiune cu ajutorul interferometriei holografice se prezintă în § 4.8.3.

Deşi interferometria holografică a permis mari progrese tehnice în obţinerea reţelelor de izocromate şi izopache, totuşi mai există, în prezent, greutăţi în ceea ce priveşte :

— separarea reţelei de izocromate de reţeaua de izopache, în anumite cazuri de solicitare şi anume cînd cele două reţele sînt aproape suprapuse,

— numerotarea franjelor de izopache atunci cînd forma modelului şi încărcarea sînt complexe.

BIBLIOGRAFIE

A. Metode tensometrice bazate pe fenomenul moiré

1. ANDREEVA, N. E., *Metod muarovi evo primenenie kascetu plastin*, Stroitelistvo i arhi; tectura nr. 17, 1959.
2. ANDREEVA, N. E., *Isledovanie izghiba plastinok metodom muarov*, Isledovanie procinosti i ustoicivosti ivineslevosti elementov. lateralinih aparatov, sb. Nr. 5, Trud. VVIA 1962.
3. BAUMANN, J., *ORWO Mikratplatte LO2*. Bild und Tom 23 (1970)7.
4. BOONE, P. M. : *Laser Produced Moiré Gratings*. Strain 5 (1969)
5. BOONE, P. M., *A Method for Directly Determining Surface Strain Fields Using Diffraction Gratings*. Experimental Mechanics 11 (1971).
6. BOONE, P. M., W. van BEEK., *Moiré Fringe Multiplication with a Spatially Filtering Projection System*. Strain 6 (1970).
7. BURCH, J. M., D.A. PALMER, *Interferometric Methods for the Photographic Production of Large Gratings*. Optica Acta 8 (1961).
8. CHIANG, F. P., *Deflection Measurements Using Moiré Gap*. Experimental Mechanics, july, 1971.
9. CHIANG, F. P., RANGANOYAKAMMA B., *Some Experimental Evidence for the Validity of Moiré Gap Equation*. Experimental mechanics, 10(7) 1970.
10. CHIANG, F. P. J. TREIBER, *A Note on Lightenberg Reflective Moiré Method*. Experimental Mechanics 10 (1970).
11. DANTU, P., *Utilisation des réseaux pour l'étude des déformations*, Anales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics nr. 121, 1958.
12. DANTU, P., *La méthode des réseaux pour les déformations*, Comptes rendus Academie des sciences Paris, decembre, 1954.
13. DANTU, P., *Utilisation des réseaux pour l'étude des déformations*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées publ. 57, 6, 1957.
14. DANTU, P., *L'application d'une nouvelle méthode pour détérminer les contraintes en élasticité plane*, Annales des Ponts et Chaussées, 1952.
15. DANTU, P., *Diverses recherches d'éxtensometrie et de détermination des contraintes*, Analyse des contraintes, tom II, nr. 2, 1954.
16. DANTU, P., *Applications reologique de la méthode des réseaux*, Colloque international de reologie, Paris, juin, 1960.
17. DANTU, P., *Moiré du deuxieme ordre, méthode permettant d'obtenir directement les lignes d'égale dilatation*, Laboratoire Central des Ponts et de Chaussées Paris, publ. nr. 66 — 6, 1966.
18. DANTU, P., *Extension of the Moiré Method to Thermal Probleme*, Experimental Mechanics nr. 4, 1964.
19. DURELLI, A. J., DANIEL, J. M., *A Nondestructive Three Dimensional Strain Analysis Method* Journal of Applied Mechanics, mart. 1961.
20. DIRUY, M., *L'Analyse des contraintes par la méthode des réseaux optiques*, Docaero-Paris, nr. 55, mars, 1959
21. DIRUY, M., *Etat actuél de la téchnique du moiré en France*, Laboratoire Central des Ponts et Chausées, Paris, 1968.
22. DIRUY, M., *Extensometrie par moiré*, Publication du GAMAC Paris, 1967.
23. DIRUY, M., *Extensometre de haute sensibilité pour mesures sur grande base*, Révue française de Mécanique, 2, 4, 1962.

Scanned with OKEN Scanner

24. DURELLI, A. J., *Visual Represintation of the Kinematice of the Continuum*, Experimental Mechanics, nr. 2, 1966.
25. DURELLI, A. J., PHILLIPS, E. A. TSAO, C. H., *Introduction to the Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain*, Mc Graw-Hill Book Company, New York — — Toronto — London, 1958.
26. DYKES, B. C., *Analysis of Displacements in Large Plates by the Grid—Shadow Moiré Technique*, Experimental Stress Analysis and its Influence on Design, Cambridge-England, 1970.
27. EBBENI, J., *Nouveaux aspects du phénomene de moiré*, Nouvelle Revue Optique Appliquée, tom. I, nr. 4, 1970.
28. EBBENI, J., *Observation en incidence oblique des phénomenes des moirés, par reflexion sur une plaque gauchie*, Bulletin de la classe des sciences, tome 22, Bruxelles, 1964.
29. EBBENI, J., *Influence des defauts des réseaux et de la difraction sur la forme et le contraste des franges de moiré*, Bulletin de la classe des sciences, tome LI, 6, Bruxelles, 1964.
30. EBBENI, J., *Combinaison d'une méthode de moiré et d'une méthode holographie pour déterminer l'état de déformation d'un objet diffusant*. Preprints of the Fifth International Conference on Experimental Stress Analysis, Udine, 1974.
31. EBBENI, J. REZETTE, Y., *Nouveaux développements de la méthode des moirés applique à l'étude des structures*. Procedings of the Fourts International Conference on Experimentale Stress Analysis, Cambridge, 1970.
32. EBBENI, J., *Nouveaux aspects du phénomene de moiré. Formation* des franges de moiré en lumiere incoherente. Nouvelle Revue d'Optique Appliquée, nr. 5, 1970.
33. EBBENI, J., *Nouveau aspects du phenomene de moiré*. Formation des franges en éclairement coherent. Nouvelle Revue d'Optique Appliquée, nr. 6, 1970.
34. EBBENI, J., RYCHTER, E., *Application de méthodes de moiré pour la mesure du coefficient de Poisson des matériaux élastiques*. Revue française de Mechanique 1971.
35. EBBENI, J., *Etude generale de phénomene de moirure*. Dissertation presentée pour l'obtention du grad de docteur en sciences phisiques, Presses Universitaires de Bruxelles, 1969.
36. FESSLER, H., T. E. THORPE, *Some Practical Improvements in Moiré Tehnique*. Strain 8 (1972)
37. EVENSEN, D. A., *High—Speed Photographic Observation of the Buckling of thin Cylinders*. Experimental Mechanics, 4. I. 1964.
38. FILDER, R., NURSE, P., *Development in the Technique of strain Analysis by the Moiré Method VDI — Berichte*, nr. 102 — 1966.
39. FILDER, R., I. LAW, P. NURSE, *Triangular and* $\sqrt{2}$ *Gratings for the Moiré Technique*, Strain 6 (1970) 2.
40. FROCHT, M. M., *Isopachic Stress Patterns*, Journal Applied Physics, nr. 1, 1939.
41. HARDY, A. K., *Techniques for Aplying the Moiré to Large Specimens and Welded Joints*. Strain 6 (1970) 2.
42. HEYMANN, J., u. R. MEYER, *Beitrag zur Herstellung von Phasenratselrn für Dehungsmessungen mit dem Moiréverfahren*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, XIV (1972), 5,
43. HEYMANN, I., *Entwicklungstendenzen des Moiroeverfahrens*. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 52 (1972) .
44. HOLISTER, G. S. *Production of High-Density Moiré Grids*. Authors'Closure, Experimental, Mechanics 9 (1969), 6.
45. HOLISTER, G. S., JONES, W. E., LUXOMORE, A. R., *A Moiré Extensometer*, Strain, 2, 4, 1966.
46. KOSTAK, B. POPP, A., *Moiré Strain Gauges*. Strain, vol. 2, 1966.
47. LEHMANN, R., WIEMER, A., *Untersuchungen zur Theorie der Doppelraster als Mittel zur Messanzeigen Feingeräale.Tech.*, 2, 5, 1963.
48. LICHTENBERG, F. K., *The Moiré Method: A New Experimental Method for the Determination of Moments in Small Slab Models*, Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, vol. XII, nr. 2, 1955.
49. LIGHTENBERG, F. K., *Over enn methode om door een eenvonding experiment de momenten in styve platen te bepalen*, Ingénieur, 64, 9, 1952.
50. MOCANU, D. R., PINTILIE, M., *Contribuţii la studiul deformaţiilor şi la determinarea caracteristicilor elastice ale unor materiale plastice indigene utilizind metoda moiré*. Comunicare prezentată la Sesiunea Ştiinţifică din 10 — 12 mai 1968, Institutul Politehnic Timişoara.

Scanned with OKEN Scanner

109. ATANASIU, C., *Mésures spéctroscopiques des déformations. Séminaire* d'Analyse des Contraintes, Bruxelles, 1974.
110. ATANASIU, C., *Procedeu pentru mărirea preciziei de măsurare a deformaţiilor prin metoda moiré-urilor*. Comunicare prezentată la a IV-a Conferinţă naţională de mecanică, Bucureşti, 1975.
111. BORN, M., WOLF, E., *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1964.
112. CUCUREZEANU, I., SUCIU, P., Curs de holografie, Institutul Politehnic Bucureşti, 1973.
113. EBBENI, J., *Combinaison d'une méthode de moiré et d'une méthode holographique pour déterminer l'état de déformation d'un objet diffusant*, Preprints of the Fifth International Conference on Experimental Stress Analysis, Udine, Italy, 1974.
114. EBBENI, J., REZETTE, Y., *Accroissement de la sensibilité de la méthode des moirés et mesure directe de la déformation par l'étude des effets liés à la diffraction de la lumière*, Séminaire d'Analyse des Contraintes, 1969.
115. GOODMAN, W., *Fourier Optics*, Mc. Graw-Hill, New-York, 1968.
116. KOCH, A., Détermination des isopaches par interférometrie, Université Libre de Bruxelles, Séminaire d'Analyse des Contraintes, nr. 9, 1969.
117. REZETTE, Y., *Interférométrie par l'emploi de l'holographie en photoélasticité*, Comptes rendus du quatrième congrès canadien de mécanique appliquée, Montreal, 1973.
118. RUSU, O., RUSIU, GH., ATANASIU, C., BORZA, D. *Holografia*. Aplicaţii în domeniul rezistenţei materialelor, Institutul Politehnic Bucureşti, 1973.
119. SMITH, H., *Principles of Holography*. Wiley interscience, New-York, 1969.
120. VIENOT, J., *Holographie optique*, Dunod, Paris, 1971.
121. VLAD, V., *Introducere în holografie*, Editura Academiei R.S.R., Bucureşti, 1973.

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINSUL VOLUMULUI II

6. **Studiul cîmpurilor de tensiuni singulare cu ajutorul causticelor** (acad. prof. dr. P. S.Theocaris)
6.1. Introducere
6.2. Principiul metodei
6.3. Curba caustică generată la extremitatea unei fisuri într-o placă de material plastic birefringent
6.4. Curba caustică generată la extremitatea unei fisuri într-o placă din material elastic şi izotrop optic
6.5. Proprietăţile curbelor caustice
6.6. Forma causticelor experimentale şi determinarea coeficientului de concentrare a tensiunilor
6.7. Causticele în cazul cîmpurilor de tensiuni singulare create de fisuri
6.8. Caustice create de singularităţi ale forţelor
6.9. Pseudocausticele
6.10. Causticele în cazul cîmpurilor de tensiuni nesingulare
6.11. Aplicaţii ale causticelor în plasticitate
6.12. Utilizarea causticelor la studiul singularităţilor complexe în cazul materialelor cvasi-izotrope

7. **Metoda lacurilor casante** (prof. dr. doc. D. R. Mocanu, ing. L. Năilescu)
7.1. Noţiuni introductive
7.2. Lacuri casante şi tehnica utilizării lor
7.3. Etalonarea lacurilor
7.4. Detectarea fisurilor în stratul de lac
7.5. Tensiunile în stratul de lac
7.6. Exemple de cîmpuri de fisuri
7.7. Interpretarea cantitativă a cîmpului de fisuri
7.8. Metoda lacurilor casante auxiliar al tensometriei electrice şi al fotoelasticităţii

8. **Determinarea experimentală a tensiunilor remanente**
8.1. Originea şi clasificarea tensiunilor remanente (prof. dr. doc. D. R. Mocanu)
8.2. Metode distructive şi semidistructive (prof. dr. doc. D. R. Mocanu şi dr. ing. C. Burada)
8.3. Metode distructive şi nedistructive utilizate în cazul îmbinărilor sudate (prof. dr.doc. D. R. Mocanu, prof. dr. doc. V. Popovici, ing. M. Băltănoiu)
8.4. Metode nedistructive (prof. dr. doc. D. R. Mocanu)
8.5. Măsurarea tensiunilor remanente din straturile metalice depuse electrolitic (conf. dr. ing. D. Horbaniuc)
8.6. Utilizarea razelor X în tensometrie (prof. dr. ing. M. Tripa)

9. **Utilizarea analogiilor electrice în tensometrie** (dr. ing. N. Iliescu)
9.1. Elemente de teoria modelării
9.2. Modelarea electrică a cîmpului fizic
9.3. Aplicaţii

10. **Măsurări tensometrice pe modele** (conf. dr. ing. M. Modiga)
10.1. Noţiuni introductive
10.2. Bazele teoriei modelării
10.3. Modelarea în problemele teoriei liniare a elasticităţii
10.4. Modelarea barelor, sistemelor de bare şi a plăcilor
10.5. Proiectarea modelelor
10.6. Alegerea materialelor pentru modele
10.7. Executarea modelelor
10.8. Solicitarea modelelor
10.9. Testarea modelelor
10.10. Aplicaţii

Scanned with OKEN Scanner

11. **Etalonarea tensometrelor** (ing. N. Fintinaru)
11.1. Etalonarea tensometrelor amovibile
11.2. Etalonarea traductoarelor rezistive
11.3. Etalonarea punților și amplificatoarelor tensometrice

12. **Prelucrarea statistică a datelor experimentale** (prof. dr. ing. N. Buga, dr. ing. I. Constantinescu)
12.1. Generalități
12.2. Erori de măsurare
12.3. Repartiția normală a erorilor aleatorii de măsurare
12.4. Caracteristicile metrologice ale mijloacelor de măsurare
12.5. Prelucrarea statistică a rezultatelor măsurătorilor
12.6. Metoda celor mai mici pătrate
12.7. Prelucrarea datelor experimentale în cazul repartițiilor multidimensionale
12.8. Exemple de calcul. Concluzii

13. **Introducere în analiza tensiunilor prin elemente finite** (conf. dr. ing. I. Pascariu)
13.1. Noțiuni introductive
13.2. Elemente de algebră matriceală utile analizei prin elemente finite
13.3. Bazele teoretice ale analizei tensiunilor prin elemente finite
13.4. Etape ale calculului tensiunilor prin elemente finite
13.5. Elemente finite izoparametrice
13.6. Aplicarea elementelor finite în cazul încovoierii plăcilor plane. Program de calculator
13.7. Probleme ale valorilor proprii (flambaj și vibrații)

Încheiere. Indicații privind alegerea metodelor și tehnicilor tensometrice (prof. dr. doc. ing. D. R. Mocanu, ing. L. Năilescu)
1. Principalele caracteristici ale metodelor și tehnicilor tensometrice
2. Indicații privind selectarea metodelor și tehnicilor tensometrice
3. Exemple de alegere a metodelor tensometrice

Scanned with OKEN Scanner